



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**SERVICIOS ECOSISTÉMICOS CAPTURA DE CARBONO Y
RECARGA DE ACUÍFEROS EN CUATRO MUNICIPIOS AL PONIENTE
DEL ESTADO DE MÉXICO: (2000-2018)**

TESIS

**Que para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Presenta:

José Carlos Camacho Reyes

Dirigida por:

Tutor académico: Dr. Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo

Tutores adjuntos: Dr. Miguel Ángel Balderas Plata

Dr. José Manuel Camacho Sanabria

Toluca, México; Septiembre de 2021

ÍNDICE

RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN	11
Planteamiento del problema	12
Preguntas de investigación.....	13
Hipótesis	13
Justificación	13
Objetivos.....	15
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	17
1.1 Evolución de las Ciencias Ambientales	17
1.2 Teoría General de Sistemas aplicada a las ciencias ambientales.....	20
1.3 La Geografía como ciencia multidisciplinaria	24
1.3.1 Tradición regional:	25
1.3.2 Tradición espacial:	25
1.3.3 Tradición humanista:	26
1.3.4 Tradición ambiental:	29
1.4 Geografía Ambiental como disciplina de investigación holística	30
1.5 La esencia de los ecosistemas	31
1.6 Cambios de cobertura y uso del suelo	33
1.7 Servicios ecosistémicos	34
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	47
2.1 Área de estudio	47
2.2 Etapas metodológicas	48
2.2.1 Etapa metodológica 1. Caracterización geográfica y ambiental en cuatro municipios al poniente del Estado de México	48
2.2.2 Etapa metodológica 2. Descripción de los ecosistemas terrestres en cuatro municipios al poniente del Estado de México	48
2.2.2.1 Identificación de los ecosistemas presentes	48
2.2.2.2 Clasificación	49
2.2.2.3 Post-clasificación:.....	50
2.2.2.4 Dinámica de los cambios de cobertura y uso del suelo	54
2.2.3 Etapa metodológica 3. Servicio ecosistémico de soporte captura de carbono en cuatro municipios al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018.....	57
2.2.3.1 Validación “ <i>in situ</i> ” del estado y porte de los árboles en los ecosistemas forestales de los cuatro municipios al poniente del Estado de México	58

2.2.4 Etapa metodologica 4. Servicio ecosistémico de soporte recarga de acuíferos en cuatro municipios al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018	59
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
3.1 Caracterización geográfica y ambiental en cuatro municipios al poniente del Estado de México	64
3.1.1 Elementos y componentes abióticos	64
3.1.2 Elementos y componentes socioeconómicos	71
3.2 Descripción de los ecosistemas terrestres en cuatro municipios al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018	77
3.2.1 Post-clasificación (validación) de los ecosistemas terrestres	81
3.2.2 Dinámica de los cambios de cobertura y uso del suelo en los ecosistemas para cuatro municipios al poniente del Estado de México	90
3.2.3 Distribución espacial de los ecosistemas terrestres en cuatro municipios al poniente del Estado de México para el año 2018 con validación “ <i>in situ</i> ”	93
3.2.4 Ecosistemas terrestres originarios en cuatro municipios al poniente del Estado de México	95
3.3 Captura de carbono en cuatro municipios al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018	102
3.3.1 Captura de carbono al poniente del Estado de México para el año 2000	102
3.3.2 Captura de carbono al poniente del Estado de México para el año 2018	105
3.3.3 Validación “ <i>in situ</i> ” del diámetro y altura de árboles presentes al poniente del Estado de México	109
3.4 Recarga de acuíferos al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018	113
3.4.1 Volumen de recarga neta potencial al poniente del Estado de México para el año 2000	113
3.4.2 Volumen de recarga neta potencial al poniente del Estado de México para el año 2018	116
3.5 Relación de la captura de carbono con el volumen de recarga de acuíferos al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018	120
3.6 Discusión General	121
CONCLUSIONES	127
RECOMENDACIONES	129
BIBLIOGRAFÍA	130

Índice de tablas

No.	Tabla	Pág.
1	Conceptos de sistema	23
2	Lista de servicios ecosistémicos	39
3	Tamaño por categoría	53
4	Matriz de confusión o error	54
5	Ecuaciones para determinar los índices de fiabilidad y el medio-intervalo de confianza	55
6	Matriz de confusión expresada en proporción	56
7	Matriz de cambios o tabulación cruzada	57
8	Indicadores e índices de cambio	58
9	Índices de captura de carbono por ecosistema forestal	60
10	Precipitación y temperatura media anual al poniente del Estado de México 2000-2016	61
11	Valores de capacidad del suelo para resistir al desprendimiento de partículas por efecto de la lluvia (factor K) que son utilizados en México	63
12	Características de los tipos de suelos de acuerdo a su capacidad de resistencia	64
13	Escala de intervalos	65
14	Características de los tipos de suelos al poniente del Estado de México	71
15	Número de habitantes al poniente del Estado de México	74
16	Porcentaje del incremento de la población en la zona del poniente del Estado de México	75
17	Densidad de población al poniente del Estado de México	75
18	Población económicamente activa e inactiva al poniente del Estado de México	76
19	Población alfabeta y analfabeta de 15 años y más al poniente del Estado de México	76
20	Migración de la población al poniente del Estado de México	77
21	Población derechohabiente y no derechohabiente al poniente del Estado de México	78
22	Total de viviendas al poniente del Estado de México	78
23	Superficie de los ecosistemas presentes en los cuatro municipios para el año 2000	79

24	Superficie de los ecosistemas presentes en los cuatro municipios para el año 2018	81
25	Análisis de la confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años 2000 y 2018	84
26	Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años 2000 y 2018 expresada en proporción	86
27	Análisis de la confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años 2000 y 2018 expresada en proporción y corregida de acuerdo con Card (1982)	88
28	Coeficientes de los índices de confiabilidad e intervalos de confianza	90
29	Superficies obtenidas de la clasificación, superficies corregidas por el método de Card y proporción de la superficie corregida para cada ecosistema	91
30	Dinámica de los cambios de la superficie de cada ecosistema en el área de estudio para los años 2000 y 2018	93
31	Indicadores de Braimoh 2000-2018	94
32	Validación <i>"in situ"</i> al poniente del Estado de México	95
33	Total de captura de carbono por ecosistema forestal al poniente del Estado de México para el año 2000	104
34	Captura de carbono por municipio y ecosistema forestal para el año 2000	105
35	Total de captura de carbono por ecosistema forestal al poniente del Estado de México para el año 2018	107
36	Captura de carbono por municipio y ecosistema forestal para el año 2018	108
37	Cambios en la superficie y captura de carbono por ecosistema forestal al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018	111
38	Características ambientales y morfológicas de los ecosistemas del bosque de Oyamel, de Pino y mixto de Pino-Encino	113
39	Volumen de recarga neta potencial al poniente del Estado de México en millones de metros cúbicos (Mm ³) para el año 2000	115
40	Volumen de recarga neta potencial por municipio al poniente del Estado de México en millones de metros cúbicos (Mm ³) para el año 2000	116
41	Volumen de recarga neta potencial al poniente del Estado de México en millones de metros cúbicos (Mm ³) para el año 2018	118

42	Volumen de recarga neta potencial por municipio al poniente del Estado de México en millones de metros cúbicos (Mm ³) para el año 2018	119
43	Cambios en el volumen de recarga neta potencial en millones de metros cúbicos (Mm ³) al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018	122

Índice de mapas

No.	Mapa	Pág.
1	Ubicación geográfica de cuatro municipios al poniente del Estado de México	49
2	Fisiografía al poniente del Estado de México	66
3	Elevaciones al poniente del Estado de México	68
4	Climas al poniente del Estado de México	69
5	Hidrografía al poniente del Estado de México	70
6	Precipitación media anual al poniente del Estado de México	71
7	Edafología al poniente del Estado de México	73
8	Ecosistemas en los municipios de Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria al poniente del Estado de México para el año 2000	80
9	Ecosistemas en los municipios de Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria al poniente del Estado de México para el año 2018	82
10	Distribución espacial de los ecosistemas terrestres en cuatro municipios al poniente del Estado de México (2018) mediante validación de campo " <i>in situ</i> "	96
11	Ecosistemas forestales al poniente del Estado de México (2000)	106
12	Ecosistemas forestales al poniente del Estado de México (2018)	109
13	Volumen de recarga neta potencial al poniente del Estado de México en millones de metros cúbicos (Mm ³) [2000]	117
14	Volumen de recarga neta potencial al poniente del Estado de México en millones de metros cúbicos (Mm ³) [2018]	120

Índice de fotografías

No.	Fotografía	Pág.
1	Bosque de Oyamel al poniente del Estado de México	98
2	Bosque mixto de Pino-Encino al poniente del Estado de México	99
3	Bosque de Pino al poniente del Estado de México	99
4	Cuerpos de agua al poniente del Estado de México	100
5	Asentamientos humanos al poniente del Estado de México	100
6	Agricultura de riego al poniente del Estado de México	101
7	Agricultura de temporal al poniente del Estado de México	102
8	Pastizales al poniente del Estado de México	102
9	Suelos desprovistos de vegetación al poniente del Estado de México	103
10	Medición de altura y diámetro de los árboles forestales al poniente del Estado de México	112

Índice de gráficas

No.	Gráfica	Pág.
1	Población alfabeta y analfabeta de 15 años y más al poniente del Estado de México	76
2	Migración de la población al poniente del Estado de México	77

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un análisis de los servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono y recarga de acuíferos en cuatro municipios al poniente del Estado de México (Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria) para los años 2000 y 2018, con la finalidad de identificar las áreas que tienen mayor y menor captura de carbono y recarga de acuíferos (volumen de recarga neta potencial del recurso agua).

Para realizar el análisis de captura de carbono en los cuatro municipios para los años 2000 y 2018 se identificaron los distintos ecosistemas forestales que se localizan en el área de estudio mediante el uso de imágenes de satélite Landsat 7 ETM del año 2000 y Landsat 8 OLI/TIRS del año 2018, las cuales fueron clasificadas a través del método híbrido (clasificación supervisada e interpretación interdependiente). Este método permite obtener mapas más precisos con la realidad y así tener menor número de errores entre los ecosistemas forestales, a partir de estos insumos se calculó la superficie de cada ecosistema forestal para ambos años, además los mapas fueron evaluados para conocer su confiabilidad a través del diseño de muestreo, evaluación de los sitios de verificación y análisis de los datos.

Los índices de captura de carbono para cada ecosistema forestal se determinaron con base en métodos preestablecidos por distintos autores, los índices determinados fueron multiplicados por la superficie del ecosistema forestal correspondiente. A través del trabajo "*in situ*" y con el uso del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) se realizó la validación de los ecosistemas forestales. Los resultados de dicho análisis muestran un almacenamiento de carbono (2, 009,850 toneladas*ha) para el año 2000 y de (2, 252,055 toneladas*ha) para el año 2018.

Referente a la recarga de acuíferos, se abordó el análisis con base a la metodología del balance hídrico mediante la recolección de datos de precipitación y temperatura media anual de 22 estaciones meteorológicas consultadas del Servicio Meteorológico Nacional y el desarrollo de distintas ecuaciones (estimación de la precipitación, del escurrimiento superficial y del volumen de evapotranspiración) para así obtener la estimación del volumen de recarga neta potencial. Los resultados referentes a la recarga de acuíferos

muestran una recarga hídrica de (595,978 Mm³) para el año 2000 y de (625,457 Mm³) para el año 2018.

En el área de estudio, el incremento del almacenamiento de carbono es producto del crecimiento de superficie de la cobertura forestal. El incremento de la recarga hídrica es producto de los datos de precipitación y temperatura media anual de 22 estaciones meteorológicas.

Palabras clave: Carbono, ecosistemas, método híbrido, recarga de acuíferos y servicios ecosistémicos.

ABSTRACT

In the present work, an analysis of the ecosystem services to support carbon capture and aquifer recharge was carried out in four municipalities to the west of the State of Mexico (Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende and Villa Victoria) for the years 2000 and 2018, in order to identify the areas with the highest and lowest carbon sequestration and aquifer recharge (potential net recharge volume of the water resource).

To carry out the analysis of carbon sequestration in the four municipalities for the years 2000 and 2018, the different forest ecosystems that are located in the study area were identified through the use of Landsat 7 ETM satellite images from the year 2000 and Landsat 8 OLI / TIRS of the year 2018, which were classified through the hybrid method (supervised classification and interdependent interpretation). This method allows obtaining more accurate maps with reality and thus having fewer errors between forest ecosystems, from these inputs the surface of each forest ecosystem was calculated for both years, in addition the maps were evaluated to know their reliability through of sampling design, evaluation of verification sites and data analysis.

The carbon sequestration indices for each forest ecosystem were determined based on pre-established methods by different authors, the determined indices were multiplied by the area of the corresponding forest ecosystem. Through the "in situ" work and with the use of the Global Positioning System (GPS), the validation of the forest ecosystems was carried out. The results of this analysis

show a carbon storage (2, 009,850 tons * ha) for the year 2000 and of (2, 252,055 tons * ha) for the year 2018.

Regarding the recharge of aquifers, the analysis based on the water balance methodology was approached by collecting data on precipitation and annual average temperature from 22 meteorological stations consulted by the National Meteorological Service and the development of different equations (estimation of precipitation, surface runoff and evapotranspiration volume) in order to obtain an estimate of the potential net recharge volume. The results referring to the recharge of aquifers show a water recharge of (595,978 Mm³) for the year 2000 and of (625,457 Mm³) for the year 2018.

In the study area, the increase in carbon storage is the product of the growth in the area of forest cover. The increase in water recharge is the product of precipitation and average annual temperature data from 22 meteorological stations.

Keywords: Aquifer recharge, carbon, ecosystems, ecosystem services and hybrid method.

INTRODUCCIÓN

El análisis de los servicios ecosistémicos de soporte de captura de carbono y recarga de acuíferos en cuatro municipios (Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria) al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018, está enfocado en contextualizar en tiempo y espacio las condiciones que determinan el almacenamiento de carbono y la recarga de agua subterránea.

Los servicios ecosistémicos permiten al ser humano obtener beneficios de manera directa e indirecta del medio ambiente.

Los cuatro municipios que integran el área de estudio se caracterizan por la presencia significativa de recursos forestales, así como de otras coberturas terrestres que permiten describir la dinámica de cambios de cobertura y uso del suelo que ha existido entre ellas, esto permite identificar el incremento o pérdidas de superficie de las coberturas y así cuantificar las toneladas de carbono almacenado por los ecosistemas forestales para los años 2000 y 2018.

Referente a la recarga de acuíferos, el área de estudio al ser zona importante de recarga que capta el agua y es trasladada a la Ciudad de México a través del sistema Cutzamala, el análisis de la recarga de acuíferos (volumen de recarga neta potencial) permite identificar las zonas bajas, media y altas de recarga, además de cuantificar la recarga hídrica para los años 2000 y 2018.

Los servicios ecosistémicos de soporte de captura de carbono y recarga de acuíferos son muy importantes para la vida de los seres vivos, ya que de manera directa el recurso agua es necesario para la vida humana y de manera indirecta la captura de carbono realizada por los ecosistemas forestales permite mejorar la calidad de vida de los seres vivos mitigando el dióxido que es dañino para la salud.

Planteamiento del problema

Los cambios de uso de suelo derivan las siguientes problemáticas: pérdida del hábitat y fragmentación, sobreexplotación de los recursos naturales, introducción de especies exóticas, contaminación del ambiente (acuático y terrestre), propagación de enfermedades, crecimiento demográfico (asentamientos humanos), planeación deficiente de las estrategias de conservación (por ejemplo, áreas de protección de flora y fauna inadecuadas), descontrol en la asignación de los permisos de colecta científica, manejo de especies en cautiverio, fallas en la educación ambiental, los mitos, la religión, entre otros (Young *et al.*, 2001).

“La creciente tendencia de conversión de usos de suelos hacia zonas urbanas, agrícolas y ganaderas, así como la contaminación, cambio climático, pérdida y compactación de suelos son las principales causantes de daños a los ecosistemas naturales” (Flores, 2019). “La afectación de los ecosistemas repercute de manera negativa y directamente en la capacidad que estos tienen para brindarnos bienes y servicios, la reducción de estos significa la pérdida de bienestar” (Flores, 2019).

En cuatro municipios al poniente del Estado de México el problema es el cambio de uso de suelo, la primordial causa de la degradación ambiental modificando las condiciones climatológicas, elevando temperaturas e induciendo año con año una menor precipitación pluvial y por consecuencia menores volúmenes hidrológicos en manantiales y cauces de ríos y arroyos.

En la actualidad se desconoce el beneficio o potencial que tienen los municipios del área de estudio para la captura de carbono y cuestiones de recarga del acuífero, esto con la finalidad de seguir conservando o en su caso revertir las posibles causas que están provocando los cambios de uso del suelo, siendo uno de los principales problemas que están afectando estos dos servicios ecosistémicos de soporte, por lo tanto, es importante conocer estas dos variables que nos permitan analizar el comportamiento.

Por otra parte, se desconoce la importancia que tiene la captura de carbono donde uno de sus principales beneficios es que permite mejorar la calidad de

vida para el ser humano, mientras que la recarga de acuíferos permite retener el agua y transferirla a ríos, a la sociedad a través de pozos y manantiales.

Preguntas de investigación

¿Cuáles son los ecosistemas terrestres presentes al poniente del Estado de México?

¿Cuánto es la captura de carbono para cada ecosistema forestal al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018?

¿Cuánto es la recarga de acuíferos al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018?

Hipótesis

En el periodo 2000-2018 se han presentado cambios positivos en los servicios ecosistémicos de captura de carbono y recarga de acuíferos al poniente del Estado de México derivados del crecimiento de superficie forestal.

Justificación

Los servicios ecosistémicos son los beneficios que obtiene el ser humano de la naturaleza y le pueden beneficiar de manera directa e indirectamente, para el caso de estudio, el análisis de los servicios ecosistémicos se define en la categoría de soporte porque permiten el desarrollo de procesos del ecosistema, la importancia de analizar los servicios ecosistémicos de soporte en cuatro municipios al poniente del Estado de México es esencial porque permite evaluar la recarga de acuíferos y la captura de carbono.

Con base en la clasificación Balvanera *et al.* (2017), los servicios ecosistémicos de soporte se enfocan en la regulación del clima ya que permite analizar el carbono almacenado en la vegetación tomado de la atmosfera y regulación de inundación permitiendo analizar la infiltración del agua para reducir la cantidad de flujo de la misma.

Por su parte, los años de estudio en el espacio geográfico (2000 y 2018), es importante porque permite identificar cuáles son los cambios que han presentado los ecosistemas presentes, así mismo, calcular la captura de carbono y recarga de acuíferos que existía en los años 2000 y 2018 asemejando que factores influyeron en los resultados de estos dos servicios ecosistémicos de soporte.

La importancia de analizar los servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono y recarga de acuíferos en cuatro municipios al poniente del Estado de México, es necesario porque permite identificar las zonas susceptibles de captura de carbono que son áreas con incentivos que se están generando, por otra parte, la captura de carbono es un elemento esencial para la gestión ambiental a través de programas de captura de carbono o pago por servicios ambientales en bosques como un instrumento que permita la transición hacia el desarrollo sustentable mejorando la calidad de los ecosistemas forestales, suelos y la eficiencia en su producción. En la actualidad la captura de carbono permite mitigar el dióxido de carbono generando una mejor condición de vida en los habitantes de la zona de estudio reduciendo los efectos del cambio climático.

Por otra parte, el área de estudio es importante porque es una zona de recarga o escurrimiento, porque capta el agua y es trasladada a la Ciudad de México a través del sistema Cutzamala, además permite que los diferentes manantiales tengan el suministro de agua necesario en épocas de sequías.

Con base en los diferentes estudios de servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono proporcionan beneficios como es secuestro de carbono, de gas y regulariza las condiciones climáticas, por otra parte, el servicio ecosistémico de soporte recarga de acuíferos proveen beneficios como es la regulación del agua, flujo de agua y mejora la cantidad de agua permitiendo generar una prevención ante atenuaciones de inundaciones, mitigación y retención del agua, permitiéndole al ser humano tener una mejor calidad de vida.

Objetivos

General:

Analizar los servicios ecosistémicos de soporte de captura de carbono y recarga de acuíferos, para la estimación de carbono almacenado de acuerdo al tipo de cobertura forestal y la recarga de acuíferos en cuatro municipios al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018.

Específicos:

1. Caracterizar geográfica y ambientalmente en cuatro municipios al poniente del Estado de México para identificar los elementos y componentes abióticos y socioeconómicos.
2. Describir los ecosistemas terrestres presentes en cuatro municipios al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018.
3. Obtener la cantidad de captura de carbono de la cobertura forestal que se genera en los cuatro municipios al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018.
4. Calcular la cantidad de recarga del acuífero que aportan los cuatro municipios al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018, mediante datos de precipitación y temperatura media anual.

Estructura de la tesis

Este trabajo está estructurado por tres capítulos.

En el primero se exponen los fundamentos teóricos-conceptuales y las disciplinas que sustentan esta investigación. El segundo capítulo contiene la descripción del área de estudio y la metodología (etapas metodológicas) mediante la cual se realizó el cumplimiento de los objetivos planteados.

En el tercer capítulo se presentan los resultados y discusión derivados del desarrollo de este trabajo de investigación. El capítulo inicia con la caracterización geográfica y ambiental en cuatro municipios al poniente del Estado de México a través de elementos y componentes abióticos y socioeconómicos.

Posteriormente el capítulo continúa con la descripción de los ecosistemas terrestres en cuatro municipios al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018 a través de la post-clasificación, la dinámica de los cambios, la distribución espacial con validación "*in situ*" y con los ecosistemas terrestres originarios.

Consecutivamente el capítulo presenta la captura de carbono en cuatro municipios al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018 y la validación "*in situ*" del diámetro y altura de los árboles presentes. Subsiguientemente el capítulo continua con la recarga de acuíferos al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018 a través del volumen de recarga neta potencial. Finalmente el capítulo termina con la relación de la captura de carbono con el volumen de recarga de acuíferos para los años 2000 y 2018 y con la discusión general.

La tesis concluye mostrando las principales conclusiones, recomendaciones y las referencias bibliográficas.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Evolución de las Ciencias Ambientales

El estudio de las Ciencias Ambientales puede definirse como el campo de estudio que tiene como objeto las distintas partes de la naturaleza, de las sociedades humanas y las relaciones que existen entre ellas. Son un área de conocimiento que comienza a desarrollarse a nivel mundial y nacional desde finales de los años sesenta del siglo XX. Este nuevo campo de estudio y acción surge ante la necesidad de comprender y encontrar soluciones a la grave y compleja crisis ambiental que vive la sociedad globalizada en sus relaciones con la naturaleza, de la cual sólo se ha tomado conciencia en las últimas décadas (RCFA, 2007).

De acuerdo con Giannuzzo (2010), la ciencia ambiental, de este modo, sería una ciencia holista, por su marco referencial macro abarcador, integrador, multifacético, pero también, sintética, por articular las síntesis conceptuales y metodológicas de las distintas disciplinas que entienden, en los diversos aspectos, las problemáticas en sus aspectos micros o particulares. Se trata de una ciencia que basa sus objetivos de estudio en los efectos sobre los seres vivos como centro de las problemáticas ambientales. En consecuencia, es una ciencia que se perfila relacionando los conocimientos y metodologías inherentes: químicos, físicos, biológicos, toxicológicos, geográficos, climatológicos, ecosistémicos, propios de las llamadas ciencias exactas, físicas, naturales y de la tierra.

Las ciencias ambientales, por su parte, son las disciplinas híbridas encaminadas a la formulación de respuestas aplicadas a las problemáticas ambientales contemporáneas, como la economía ecológica, la historia ambiental, la ecología política o la ingeniería ambiental, por mencionar algunas. En general, el objeto de las ciencias ambientales es analizar el medio físico y el papel que desempeñan los humanos en él, desde diferentes perspectivas. Existen, asimismo, diversas aproximaciones, desde las muy ligadas a la ingeniería, a las más cercanas a la ecología y, en menor medida, a las ciencias sociales y las humanidades. Si se reconoce que el fin de estos campos emergentes es estudiar el medio físico en su relación con los seres humanos, se debe reconocer también la importancia de la geografía y sus aportaciones a la problematización

interdisciplinaria ambiental, a través de la espacialización o territorialización de los enfoques (Bocco y Urquijo, 2013).

Las ciencias ambientales se caracterizarían por tener en cuenta los siguientes cambios: cambio de la parte al todo, de la estructura al proceso, de la ciencia objetiva a la ciencia epistémica, de la metáfora del árbol del conocimiento a la red del conocimiento, de descripciones verdaderas por descripciones aproximadas en tanto que modelos mejorables (Morales, 2017).

Las ciencias ambientales permiten la integración de diferentes disciplinas y analizar los problemas ambientales a través de estrategias de mitigación. Los problemas ambientales generan impactos negativos en los ecosistemas repercutiendo en los bienes y servicios que el ser humano pueda obtener, la aplicación de las ciencias ambientales analiza cada uno de los componentes que se están viendo afectados y permite conocer porque están siendo afectados. Este análisis permite establecer o generar propuestas para el beneficio del medio ambiente.

De acuerdo con Saavedra (2014), las CA son un entramado de disciplinas que pueden ser entendidas como un arte en su sentido técnico que privilegia la labor manual, como los diversos saberes étnicos; un sistema ordenado de principios que privilegia la abstracción, como la Filosofía moral también llamada ética; como ciencias positivas que investigan el estado actual del mundo y que escudriñan, miden y pesan los elementos de la naturaleza, como la Biología, la Física y la Química (Ciencias Naturales); ciencias que investigan las diferentes relaciones de la naturaleza con el ser humano como la Sociología, la Economía y la Política (Ciencias Sociales), y como extensión de esas mismas ciencias como la Psicología y la Historia (Ciencias Humanas).

Las ciencias ambientales se plantean algunas líneas generales en torno al desequilibrio ecológico que actualmente se vive y a las posibilidades de construir una racionalidad alterna, capaz de vincular los procesos naturales y sociales, incorporar la práctica de la interdisciplinariedad y generar las condiciones necesarias para un nuevo enfoque de aprendizaje (Peña y Roldán, 2012).

Hechos como la contaminación y el agotamiento de los mantos acuíferos; la degradación de la calidad del aire; la erosión y pérdida de fertilidad de los suelos;

el incremento de los residuos urbanos y los desechos tóxicos industriales; la contaminación auditiva en las ciudades; el incremento en el desequilibrio entre la producción de entropía y las tasas de producción de biomasa; el calentamiento global; la existencia de venenos radiactivos y la pérdida acelerada de biodiversidad son sólo algunas de las consecuencias negativas del comportamiento irracional de la sociedad frente a la naturaleza (Agoglia, 2010).

El estudio de las ciencias ambientales permitirá comprender y caracterizar los elementos y componentes abióticos y socioeconómicos que se desarrollan en el área de estudio e identificar la relación que existe entre estos elementos y el espacio geográfico.

La ciencia de los estudios del medio ambiente es una ciencia multidisciplinaria porque comprende varias ramas de estudios como química, física, ciencias médicas, ciencias de la vida, agricultura, salud pública, ingeniería sanitaria, etc. Es la ciencia de los fenómenos físicos en el entorno, estudia las fuentes, reacciones, transporte, efecto y destino del físico, una especie biológica en el aire, el agua y el suelo y el efecto de la actividad humana sobre estas (Singh, 2006).

De acuerdo con Singh (2006), el medio ambiente está constituido por los sistemas de interacción física, biológica y cultural, elementos interrelacionados de varias maneras, tanto individual como colectivamente, estos elementos pueden explicarse como a continuación:

- **Elementos físicos:** Los elementos físicos son como el espacio, los accidentes geográficos, los cuerpos de agua, los suelos, las rocas y los minerales. Determinan el carácter variable del hábitat humano, sus oportunidades y limitaciones
- **Elementos biológicos:** Elementos biológicos como plantas, animales, microorganismos y hombres constituyen la biosfera.
- **Elementos culturales:** Los elementos culturales, como los elementos económicos, sociales y políticos, son esencialmente características creadas por el hombre, que crean un entorno cultural.

El medio ambiente es la suma de todos los factores externos, factores (bióticos y abióticos) que influyen en la vida de un organismo, biótico son los factores que

incluyen todos los seres vivos (por ejemplo, animales, plantas, y microorganismos), mientras que los factores abióticos incluyen (aire, agua, suelo, rocas, minerales y montañas). El entorno puede ser natural, diseñado por el hombre o incluso abstracto (no material). Debido a tal vaguedad, el término "medio ambiente" ha sido usado de varias maneras o en varias perspectivas. Por ejemplo, términos tales como ambiente natural, ambiente extraterrestre, ambiente de ingeniería humana, ambiente sociopolítico-cultural, negocios ambiente, ambiente familiar y ambiente de trabajo se utilizan en conversación general (Prasad *et al.*, 2015).

El análisis de los servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono y recarga de acuíferos en un espacio geográfico está relacionado con las ciencias ambientales por la integración de elementos y componentes abióticos, biológicos y culturales. En el área de estudio los factores económicos, sociales y políticos determinan las condiciones de los elementos y componentes abióticos como cuerpos de agua, suelos, climas los cuales presentan interacción con los elementos biológicos plantas, microorganismos y animales.

1.2 Teoría General de Sistemas aplicada a las ciencias ambientales

La teoría general de sistemas requiere de una integración holística de información a través de la relación que existe entre elementos y componentes ambientales, sociales y económicos que se presentan en determinado lugar.

De acuerdo con Bertalanffy (1987), la Teoría General de Sistemas es un conglomerado de ideas y principios que ayudan a comprender la organización de un determinado espacio geográfico, el cual está compuesto por una gran variedad de sistemas, los cuales a su vez se componen de subsistemas (estos tienen las mismas funciones y características de los sistemas) todo esto, dentro de una organización jerárquica y entre los cuales se presenta un incesante flujo de energía, materia e información, donde cualquier componente del sistema afectará a todos los demás debido a la relación causa-efecto que mantienen entre ellos.

La tabla 1 muestra la definición de sistema de 7 autores distintos, mostrando al mismo tiempo las características que cada uno aporta y los elementos en común que guardan sus definiciones (Domínguez y López, 2017).

Tabla 1. Conceptos de sistema

Autor y año	Definición o concepto	Elementos que conforman la definición	Elementos en común
Ludwig Von Bertalanffy (1986)	Un sistema es un complejo de elementos interactuantes (Von Bertalanffy, 1986).	- Complejo - Elementos - Interacción	- Elementos - Interacción
Carlos Ramírez Cardona (1989)	Un sistema es un conjunto de elementos constituidos, es decir, unas partes u órganos que juegan un papel determinado. Si falta una de las partes el sistema no puede funcionar (Ramírez Cardona, 1989).	- Elementos - Constituidos - Papel determinado	- Elementos
Oscar Johansen Bertoglio (1993)	Un sistema es un grupo de partes y objetos que interactúan y que forman un todo que se encuentra bajo la influencia de fuerzas en alguna relación definida (Bertoglio, 1993).	- Partes - Interacción - Relación	- Partes - Relación
Marcelo Arnold y Francisco Osorio (1998)	Un sistema es un conjunto de elementos que guardan estrechas relaciones entre sí, que mantienen al sistema directo o indirectamente unido de modo más o menos estable y cuyo comportamiento global persigue, normalmente, algún tipo de objetivo (Arnold y Osorio, 1998).	- Elementos - Relación - Unión - Estabilidad - Objetivo	- Elementos - Relación - Objetivo
John P. Van Gigch (2008)	Un sistema es una reunión o conjunto de elementos relacionados (Van Gigch, 2008).	- Elementos - Relación	- Elementos - Relación
Ana María de Guadalupe Arras Vota (2010)	Un sistema es un todo organizado, integrado por dos o más partes denominadas subsistemas que guardan una relación de interdependencia e interacción entre sí, se distinguen de su ambiente por medio de una frontera identificable y están inmersos en diversos contextos con los que interactúa (Arras Vota, 2010).	- Todo organizado - Partes o subsistemas - Relación - Ambiente - Frontera	- Partes - Interacción

Continuación de la tabla 1. Conceptos de sistema

Autor y año	Definición o concepto	Elementos que conforman la definición	Elementos en común
Ian Sommerville (2011)	Un sistema es una colección intencionada de componentes interrelacionados, de diferentes tipos, que trabajan en conjunto para lograr algún objetivo (Sommerville, 2011).	- Colección - Interrelación - Objetivo	- Interrelación - Objetivo

Fuente: Elaboración propia con base en Domínguez y López (2017).

El análisis de los servicios ecosistémicos está integrado como un sistema porque el ser humano obtiene beneficios directos e indirectos los cuales son generados por los ecosistemas y para que las condiciones de los ecosistemas sean factibles dependen de la protección del ser humano.

Arellano (2009), determina que es a partir de propuestas epistemológicas que se comienza a considerar a la ciencia desde una perspectiva holística (interdisciplinaria, multidisciplinaria y transdisciplinaria); ya que él cuestiona seriamente la pertinencia de mantener la separación ontológica de la naturaleza y la sociedad que caracterizan la producción científica.

En un sentido amplio, la Teoría General de Sistemas (TGS) se presenta como una forma sistemática y científica de aproximación y representación de la realidad y, al mismo tiempo, como una orientación hacia una práctica estimulante para formas de trabajo transdisciplinarias, la TGS se caracteriza por su perspectiva holística e integradora, en donde lo importante son las relaciones y los conjuntos que a partir de ellas emergen, en tanto la TGS ofrece un ambiente adecuado para la interrelación y comunicación fecunda entre especialistas y especialidades (Arnold y Osorio, 1998).

De acuerdo con Arnold y Osorio (1998), los objetivos originales de la Teoría General de Sistemas son los siguientes:

- a. Impulsar el desarrollo de una terminología general que permita describir las características, funciones y comportamientos sistémicos.
- b. Desarrollar un conjunto de leyes aplicables a todos estos comportamientos y, por último,

c. Promover una formalización (matemática) de estas leyes.

La Teoría General de Sistemas proporciona un enfoque trasdisciplinario que permite relacionar y sistematizar factores sociales, económicos, políticos, físicos y culturales. Un sistema al trabajar de manera ordenada y coordinada, origina que durante el trabajo se genere sinergia, lo que significa el resultado del trabajo en equipo donde los elementos interactúan entre sí con la finalidad de alcanzar algún objetivo, es mayor que si analizamos el resultado de cada uno de los integrantes por separado (Bertoglio, 1993).

A través de la TGS, los servicios ecosistémicos se analizan de forma sistémica lo cual permite identificar los factores que están condicionando los ecosistemas como políticos, sociales y económicos.

La TGS se utiliza en cualquier área, sin importar si son ciencias duras o blandas, es adaptable ya que puede expresar los resultados en términos cuantitativos, cualitativos o ambos, es aplicado a sistemas muy complejos con grandes cantidades de recursos en una forma ordenada, se basa en las estructuras teóricas de la ciencia, a partir de las cuales se construyen soluciones prácticas a los problemas, se basa en el autoaprendizaje a través de la retroalimentación (Domínguez y López, 2017) y es pragmático ya que genera un resultado orientado hacia la acción (Soto, 2016).

La teoría general de sistemas no produce soluciones para problemas, pero si produce teorías y formulaciones conceptuales que se combinan con el enfoque sistémico que utiliza la metodología y las distintas ramas filosóficas para estudiar diversas situaciones detectando problemas y encauzando a la mejor manera de solucionarlos (Triviño, 2016).

La TGS no reconoce limitaciones, al usarla en fenómenos humanos, sociales y culturales se advierte que sus raíces están en el área de los sistemas naturales (organismos) y en el de los sistemas artificiales (máquinas). Mientras más equivalencias reconozcamos entre organismos, máquinas, hombres y formas de organización social, mayores serán las posibilidades para aplicar correctamente el enfoque de la TGS, pero mientras más experimentemos los atributos que caracterizan lo humano, lo social y lo cultural y sus correspondientes sistemas,

quedarán en evidencia sus inadecuaciones y deficiencias (Arnold y Osorio, 1998).

La TGS al ser holística e interrelacionar los factores que están influyendo en la pérdida de bienes y servicios que brindan los servicios ecosistémicos permite conocer cuáles son los principales factores que están generando daños a los ecosistemas de manera particular y así proponer medidas o estrategias de mitigación que permitan la conservación de los ecosistemas.

Los sistemas lógicos y la formulación de modelos generales se aplican a todas las ciencias buscando el orden en los términos más simples. Más que una oposición entre los enfoques analíticos y sistémicos, debe verse en ellos una complementariedad, aunque irreductibles el uno al otro, la TGS busca identificar las características comunes a muchas clases diferentes de sistemas y destaca los aspectos fundamentales: estructura-ser; función-actuar; y evolución-llegar ser (Flórez y Thomas, 1993).

1.3 La Geografía como ciencia multidisciplinaria

La Geografía es la ciencia que analiza la relación que existe entre el ser humano y la naturaleza en determinado espacio geográfico, la ciencia geográfica permite el análisis de los servicios ecosistémicos y el ser humano a través de la conservación de los ecosistemas.

De acuerdo con Álvarez (2012), la geografía, como ciencia, se fundó en la búsqueda de una comprensión de la distribución, localización e interrelación de los objetos, hechos, fenómenos y procesos que tienen lugar en la superficie terrestre. Esta indagación, desde sus orígenes, se fue permeando de diversos y complejos puntos de vista científicos o no científicos, que si bien han contribuido a su enriquecimiento teórico-metodológico, también han influido en sus continuas crisis epistemológicas, y determinando un sinnúmero de disquisiciones sobre su objeto de estudio, sus funciones y su estructura.

Los seres humanos, al ocupar un entorno, se asientan y ejercen sus acciones transformando la naturaleza y dando lugar a una organización del espacio, lo cual supone un conocimiento práctico de él, por ello, la geografía es una disciplina que parte de la realidad y responde a las necesidades específicas del campo geográfico (Cervantes *et al.*, 2014).

De acuerdo con Siso (2010), la geografía presenta tradiciones y corrientes que permiten el estudio del ser humano y el medio ambiente, la evolución de la geografía, se considera que se pueden distinguir, al menos, cuatro tradiciones con múltiples corrientes geográficas.

1.3.1 Tradición regional:

Surge en la edad antigua, con los primeros intentos de indagación geográfica, a partir del momento en que la curiosidad del ser humano lo llevó a recorrer regiones distintas y lejanas a su sitio de residencia. Implica la descripción y narración de las peculiaridades de otras áreas y su delimitación espacial, dando nacimiento a las regiones geográficas. Se asocia a viajeros y exploradores, y tiene su fundamento en el trabajo de campo (Siso, 2010).

Diferenciación Regional:

Estudia lo particular, y sólo en caso de que en numerosos estudios surjan patrones comunes, se arriesga a proponer principios generales. Concibe a la geografía de manera integral, que primero analiza los elementos físicos naturales y humanos para llegar a una síntesis final (Siso, 2010).

Paisajismo:

Constituye una variante de la anterior, que se particulariza porque asume que la geografía es el estudio de la sucesión de los paisajes terrestres, de cómo éstos evolucionan en el tiempo histórico y se producen modificaciones en el escenario geográfico. Su consideración de la dimensión temporal es importante (Siso, 2010).

Ordenación territorial:

Es una consideración de la geografía como una ciencia aplicada y como una técnica administrativa, que procura conjuntamente con otras disciplinas- la ocupación racional del territorio, mediante la aplicación de normativas (planes de ordenación y reglamentos de uso) que permitan o prohíban unos determinados usos de la tierra (Siso, 2010).

1.3.2 Tradición espacial:

En parte como una reacción a la filosofía historicista, que fundamentó a la tradición regional, y en parte por la incorporación de técnicas estadísticas y

matemáticas en geografía (revolución cuantitativa), emerge la óptica de la geografía como una ciencia espacial (Siso, 2010).

Análisis localizacional:

Privilegia como centro del análisis geográfico el estudio de la localización. Se incorporan métodos y técnicas de otras disciplinas, lo cual permite un fructífero intercambio multidisciplinario. La geografía pasa a ser una ciencia que busca el desarrollo racional de leyes y teorías que procuren explicar y predecir la localización y distribución espacial de todos los fenómenos que ocurren sobre la superficie terrestre, sean éstos de carácter natural (relieve, clima, suelos, plantas, animales) o cultural (asentamientos humanos, cultivos, industrias, vías de comunicación, medios de transporte) [Siso, 2010].

Organización espacial:

Se trata de una derivación utilitaria y aplicada de la anterior, que pretende la utilización de los métodos y técnicas localizaciones para la formulación y ejecución de planes que permitan un uso óptimo de los espacios geográficos (Siso, 2010).

1.3.3 Tradición humanista:

En parte como crítica a la corriente localizacional, a su interés de reducir todo esquemáticamente a modelos de un mundo idealizado y a teorías con fundamento matemático (Siso, 1982).

Comportamentalismo:

Denominada también corriente behaviorista o conductual, considera posible una geografía analítica, sin teorías, concentrada en el comportamiento humano (Sanguin, 1980). La base cultural de las sociedades y los individuos que la conforman se traduce en imágenes mentales formadas a partir del mundo real, las cuales son afectadas por un complejo sistema de filtros sensoriales y un cúmulo de factores culturales, sociales, económicos y psicológicos (Wettstein *et al.*, 1975).

Radicalismo:

Propone que la Geografía en lugar de estudiar detalladamente las características sintéticas de una región o formular leyes y teorías de gran envergadura, con clasificaciones taxonómicas, axiomas e hipótesis, proponen que se estudien y busquen soluciones a problemas acuciantes como la pobreza crítica y la marginalidad, el escaso bienestar social en amplios grupos sociales, la exclusión territorial, la especulación en los usos y valores de la tierra, la falta de participación de los grupos sociales marginados en las políticas del sector público, etc (Siso, 1982).

Estructuralismo:

Tomando principios derivados de la lingüística, algunos autores francófonos consideran a la geografía como un lenguaje, como una semiología de la organización del espacio (Rémi y Nicolas, 1991). La cartografía es la herramienta fundamental de expresión geográfica y en los mapas y planos el geógrafo reproduce signos pictóricos y geométricos que representan hechos geográficos (líneas para ríos, carreteras y fronteras; círculos para centros poblados; áreas para regiones; flechas para flujos; curvas para isolíneas y gradientes, etc.) [Siso, 2010].

Postmodernismo:

Surge como un rechazo a la corriente comportamentalista y al positivismo lógico, asociada a una doctrina que confronta la existencia misma de una realidad objetiva común entre los agentes humanos y que sostiene la creencia de que el mundo tangible es complejo, enigmático e imposible de modelar (Fik, 2000).

A través del tiempo la ciencia geográfica ha ido evolucionando su enfoque de estudio. Existen cuatro tradiciones geográficas que están enfocadas en diferente ámbito del estudio geográfico. El análisis de los servicios ecosistémicos de captura de carbono y recarga de acuíferos presenta mayor correlación con la tradición ambiental al estudiar la relación que existe entre la naturaleza y el ser humano porque son servicios ecosistémicos que dependen de las actividades antropogénicas que se desarrollan en el área de estudio.

Esta disciplina hace uso y aplicación de los principios geográficos (localización, distribución, asociación, interacción, evolución) propuestos por el geógrafo francés Emmanuel de Martone, los cuales fueron claramente presentados y analizados por Vilá Valentí (1983). De acuerdo con Buzai y Baxendale (2006), los principios geográficos son los siguientes.

- **Localización:** Este principio considera que todas las entidades (con sus atributos asociados) tienen una ubicación específica en el espacio geográfico. Esta ubicación puede ser vista de dos maneras complementarias.
- **Distribución espacial:** El concepto considera que el conjunto de entidades de un mismo tipo se reparten de una determinada manera sobre el espacio geográfico. Estas entidades pueden ser puntos, líneas o polígonos (áreas) con diferentes atributos. Las diferencias en la distribución generan hechos o fenómenos geográficos de aglomeración, densificación, distribución desigual, entre otros.
- **Asociación:** El concepto considera el estudio de las semejanzas encontradas al comparar distintas distribuciones espaciales. El análisis visual que se realiza con posterioridad a la superposición cartográfica de ambas distribuciones resulta ser la forma de comparación más clara y directa.
- **Interacción espacial:** El concepto considera la estructuración de un espacio relacional en el cual las localizaciones (sitios), distancias (ideales o reales) y vínculos (flujos) resultan fundamentales en la definición de espacios funcionales. Se debe tener presente que los factores, elementos y componentes que determinan a un espacio geográfico están en constante interacción.
- **Evolución espacial.** El concepto considera la incorporación de la dimensión temporal a través de la permanente transición de un estado a otro. Centrarse en el dónde corresponde a una visión basada en la localización y en el cuándo a una visión basada en el tiempo. El cómo, desde un punto de vista espacial, presentaría el camino evolutivo espacio-temporal.

Considerando lo referido, se establece que el análisis de los servicios ecosistémicos de captura de carbono y recarga de acuíferos en un espacio geográfico tiene una localización específica, su distribución espacial está condicionada por los ecosistemas que se encuentran presentes, la asociación e interacción que establecen los factores sociales, económicos y naturales dan como resultado áreas homogéneas y la evolución espacial de los servicios ecosistémicos de un año inicial a un final es de suma importancia para comprender la tendencia de cambios positivos o negativos en los servicios ecosistémicos.

1.3.4 Tradición ambiental:

Define a la geografía como una ciencia que estudia las relaciones entre el ser humano y su ambiente, denominadas por alguna tradición hombre-tierra. Se desarrolla en el siglo XIX cuando, dado el predominio de los ambientes naturales, aún poco intervenidos por la acción de los seres humanos, se solía apreciar una dependencia ambiental de estos últimos (Siso, 2010).

Determinismo ambiental:

Asociada a los criterios mecanicista, en física, y evolucionista, en biología, considera que la acción y obras del ser humano están inevitablemente determinados por factores ambientales (relieve, clima, suelos, hidrografía, fauna y flora, etc.). Se concibe a la sociedad como un organismo que sobrevive ajustándose al medio ambiente, por lo que su evolución está determinada ambientalmente de antemano. La geografía se considera como una ciencia causalista, sujeta a rígidas leyes de causa a efecto, lo cual genera una conducta de estímulo respuesta en el ser humano (Siso, 2010).

Posibilismo:

Emerge como una reacción a la inflexibilidad de las tesis deterministas, y considera que siendo la geografía una ciencia ambiental la relación entre el ser humano y su medio ambiente obedece a una interrelación recíproca, que procura un equilibrio que dependerá del grado de hostilidad ambiental y del desarrollo tecnológico, material y cultural de la sociedad. El equilibrio hombre-tierra da lugar a la posibilidad de delimitar regiones geográficas características, que apoyan la

idea de que la geografía por su carácter ambiental es definitivamente una ciencia de síntesis regional (Wrigley, 1965).

Ecologismo:

Ve a la geografía como una ciencia ecológica, que adopta el concepto de ecosistema introducido por A. Transley en 1935 (Stoddart, 1967), el cual habría de convertirse en el paradigma geográfico de mayor inspiración biológica.

1.4 Geografía Ambiental como disciplina de investigación holística

La Geografía al ser una ciencia tiene ramas que se emplean en distintas disciplinas para obtener una investigación holística. El análisis de los servicios ecosistémicos de captura de carbono y recarga de acuíferos permite sustentar la investigación en esta rama para comprender la relación de las actividades antropogénicas en el ambiente.

La geografía ambiental es una disciplina emergente, que trata, como uno de los principales aspectos, la espacialidad en el análisis del medio ambiente, ya que se ocupa de las relaciones entre el hombre y la naturaleza en el espacio y el tiempo, y se orienta a la protección del ambiente. Su objeto de estudio se centra en las variantes que se detectan y producen en esa interrelación sociedad/naturaleza, las cuales conforman los diversos tipos de ambiente y derivan en consecuencias que inciden en los factores económicos y sociales, generando cambios a mayor velocidad e intensidad que los procesos naturales en un tiempo y espacio dados (Cervantes *et al.*, 2014).

La geografía cobra una relevancia especial en el contexto actual en el que aparecen muchos estudios ambientales interesados en el análisis del espacio: ciencia sustentable, ciencia del cambio de la tierra, ciencia del sistema de la tierra, sociología ambiental (Bocco y Urquijo, 2013). La geografía ambiental, como una propuesta integradora, debe contribuir a la organización del flujo de los diferentes y variopintos componentes de la investigación, más allá de los problemas de lenguaje y metodología que puede generar la pretensión holística (Demeritt, 2009).

El análisis de los servicios ecosistémicos en un espacio geográfico determinado requiere del análisis de factores económicos y sociales porque determinan las

condiciones del medio ambiente generando que existan alteraciones en los procesos naturales.

La geografía ambiental es la esfera de actividades científico investigativas orientada a la adquisición de nuevos conocimientos sobre las relaciones, fundamentalmente espaciales, entre los componentes del ambiente como totalidad compleja que emplea sus conceptos y categorías para la explicación de ciertas relaciones causales de los problemas ambientales (Cervantes *et al.*, 2014).

La geografía ambiental asocia las subdisciplinas geográficas que acuden al nuevo “campo de operaciones” que abre al conocimiento la llamada cuestión ambiental; auxiliada por esas subdisciplinas geográficas es, a la vez, auxiliar en el abordaje de problemas emergentes que, por su complejidad, requieren de nuevos fundamentos en otros saberes filosóficos, éticos y cosmovisivos. Así, también es auxiliada por la antropología, la ecología y la filosofía, sin que ninguna de ellas tenga una superioridad o jerarquía preponderante, dado que la complicación de los problemas ambientales requiere la visión de esa complejidad para poder deslizar la indagación por diversos ámbitos y dimensiones, a partir de un foco de emergencia del problema (Cervantes *et al.*, 2014).

La Geografía Ambiental al ser una subdisciplina de la Geografía que tiene por objeto de estudio la relación que existe entre los seres humanos y la naturaleza, se enfoca en los problemas ambientales que presentan los ecosistemas a través de las presiones que ejerce el ser humano sobre el medio ambiente.

Los problemas ambientales al generar consecuencias en el ámbito social, económico, político, cultural y natural, es necesario presentar acciones que permitan resiliencia de la población ante estos problemas por lo que es necesario un enfoque multidisciplinario que permitan mitigar problemas del medio ambiente y de sectores de la población.

1.5 La esencia de los ecosistemas

Los ecosistemas que se encuentran presentes en el área de estudio están conformados por factores bióticos y abióticos donde existen interacciones vitales, fluye la energía y circula la materia.

El ecosistema representa la unidad funcional básica de la ecología que comprende las comunidades bióticas relacionadas mutuamente con su ambiente no vivo o abiótico. Así, una comunidad biótica y su entorno abiótico juntos representan un ecosistema. El ecosistema, por lo tanto, incluye tanto a los organismos vivos (comunidad biótica) como a los no vivos, entorno (entorno abiótico) que están inseparablemente interrelacionados e interactúan entre sí (Tansley, 1935.) Un ecosistema es un conjunto natural de la vida y el medio ambiente, la vida se refiere a lo biótico, comunidad incluyendo las plantas, animales y otros organismos vivos. Esto se denota como biocenosis, el medio ambiente es el biotopo que abarca la región física de la vida (Balasubramanian, 2008).

De acuerdo con Jaiswal (2018), los principales pasos en la operación de un ecosistema son:

- Recepción de energía.
- Fabricación de alimentos orgánicos por los productores.
- Consumo de material orgánico por parte de los consumidores.
- Descomposición en compuestos inorgánicos.
- Transformación de estos compuestos en compuestos adecuados para la nutrición de los productores.

La diversidad biológica (biodiversidad) incluye múltiples niveles de organización: desde las diferencias entre los individuos que pertenecen a una población, hasta las diferencias entre los ecosistemas que conforman la biosfera, pasando por las existentes entre las poblaciones de una misma especie, entre las especies de una comunidad y entre las comunidades de un ecosistema (Venail, 2012).

La importancia de conservar los ecosistemas forestales al poniente del Estado de México permite la operación de los ecosistemas de forma natural como es la recepción de energía que para el caso de estudio es captura de carbono y recarga de acuíferos permitiéndole al ser humano tener una mejor calidad de vida. Los ecosistemas forestales son el hábitat de una importante diversidad biológica, desarrollan funciones ambientales como la regulación del ciclo hidrológico, captura y almacenamiento de agua, captura de carbono, generación y conservación de suelos, entre otros, y proporcionan numerosos bienes para

las poblaciones humanas, tales como alimentos, madera para construcción, leña y medicinas. México es uno de los cinco países con mayor diversidad biológica, por sus características climáticas y topográficas, este país reúne una biodiversidad que representa el 12% de la existente en el planeta albergando a unas 30 mil especies vegetales, en el territorio nacional se han diferenciado 10 tipos de vegetación que señalan 10 diferentes ecosistemas forestales (SEMARNAT, 2009).

En el área de estudio existen diferentes tipos de ecosistemas por las características ambientales en las que se desarrollan lo que permite que existan servicios ecosistémicos que benefician directamente e indirectamente al ser humano.

1.6 Cambios de cobertura y uso del suelo

Los cambios de cobertura y uso del suelo que ocurren al poniente del Estado de México son generados por la intervención del ser humano, el desarrollo de las actividades antropogénicas dan como resultado la conversión de los ecosistemas naturales.

El concepto del “cambio de uso del suelo”, traducción literal de land use change, es uno de los más ampliamente recurrentes en la literatura científica. Dicho concepto se acuñó a finales del siglo XIX en el ámbito de las ciencias sociales (geografía humana, principalmente) y en agronomía, dado que el “uso del suelo” es resultado de la actividad del hombre sobre la cubierta del suelo (Velázquez *et al.*, 2014).

Los cambios de cobertura y uso del suelo se consideran como hechos geográficos debido a la relación que guardan los conceptos de cobertura de la tierra y uso del suelo. El primero hace referencia a las características físicas y biofísicas que se observan sobre la superficie terrestre y los elementos antrópicos de la actividad humana, el segundo término, uso del suelo hace referencia a la forma en que se manejan los tipos de coberturas y normalmente tienen una connotación económica (Meyer y Turner II, 1992; Turner II *et al.*, 1995).

Las coberturas y usos del suelo tienen una localización específica, su distribución espacial está condicionada por la interacción de factores, elementos y

componentes geográficos que caracterizan a un territorio. Estas coberturas y usos del suelo evolucionan a través del tiempo, principalmente por la actividad antrópica, ocasionando por ello cambios en su superficie y estructura (Camacho-Sanabria, 2019).

El análisis de los cambios de cobertura y uso del suelo en cualquier territorio conlleva a comprender como interactúan los diversos factores socioeconómicos y biofísicos que en él se encuentran (Pineda *et al.*, 2011). Los estudios de cambio de uso de suelo y vegetación son el referente para conocer las trayectorias de los distintos procesos de cambio que existen en determinado territorio (Mas y Flamenco, 2011).

Referido lo anterior, los cambios de cobertura y uso del suelo permiten comprender el análisis de los servicios ecosistémicos de captura de carbono y recarga de acuíferos a través de la conversión de los ecosistemas en el tiempo generando cambios positivos o negativos en ambos servicios ecosistémicos.

En la actualidad para este tipo de estudios se ha propuesto el uso de metodologías y procedimientos estadísticos innovadores, que se complementan con técnicas de trabajo de campo, así como el uso y aplicación de herramientas de los denominados sistemas de información geográfica y de cartografía automatizada (Turner y Meyer, 1994).

Existen diversos métodos y técnicas para el análisis de los procesos de cambio de uso del suelo. El procedimiento más confiable para medir el grado de conversión ambiental antropogénica es el estudio de la dinámica espacio-temporal de la cubierta vegetal (Berry *et al.*, 1996), o análisis del cambio de uso/coberturas del suelo (Turner y Meyer, 1994).

1.7 Servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos de soporte de captura de carbono y recarga de acuíferos al poniente del Estado México son beneficios directos e indirectos que se obtienen de los ecosistemas. El análisis de ambos servicios ecosistémicos en un periodo de tiempo permite identificar si han existido cambios positivos o negativos en el almacenamiento de carbono y en la recarga hídrica.

Los servicios ecosistémicos son los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas y son producidos por las interacciones entre ecosistemas y sociedades (Balvanera *et al.*, 2017). Los servicios ecosistémicos son la multitud de beneficios que la naturaleza aporta a la sociedad, la biodiversidad es la diversidad existente entre los organismos vivos, que es esencial para la función de los ecosistemas y para que estos presten sus servicios (FAO, 2020). El concepto de servicios ecosistémicos ha presentado una evolución a través del tiempo en su significado y clasificación.

De acuerdo con Camacho y Ruiz (2011), el concepto de servicios ecosistémicos dio inicio en 1977 por Westeman como servicios de la naturaleza orientados a conocer el rol que tienen los ecosistemas en el ser humano. Generando que desde entonces se hayan presentado distintos intentos de generalización (Daily, 1997). En la actualidad se reconoce a la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MA), promovida y creada en el año 2003 por la ONU, como el principal referente del tema, teniendo como objetivo principal el concepto de SE que incluye las preocupaciones ecológicas en términos económicos, el de enfatizar la dependencia de la sociedad en los ecosistemas naturales, además de impulsar el interés público en la conservación de la biodiversidad (Camacho y Ruiz, 2011).

La existencia de numerosos sistemas de conceptualización y clasificación de servicios ecosistémicos ha llevado a una pluralidad en la interpretación de los servicios ecosistémicos, la terminología y las definiciones relacionadas cuando se trata de aplicaciones (Boerema *et al.*, 2016).

Una primera clasificación enfocada en diseñar una tipología sistemática y un marco de trabajo general para el análisis de funciones y servicios de los ecosistemas: Funciones de regulación: relacionado con la capacidad de los ecosistemas para regular procesos ecológicos esenciales y sostener sistemas vitales a través de ciclos biogeoquímicos y otros procesos biológicos; Funciones de hábitat: los ecosistemas naturales proporcionan hábitat de refugio y reproducción para plantas y animales contribuyendo a la conservación biológica y diversidad genética; Funciones de producción: los procesos fotosintéticos y autótrofos en general, a partir de los cuales los organismos autoabastecen sus requerimientos orgánicos a partir de compuestos inorgánicos; Funciones de

información: los ecosistemas proporcionan funciones de referencia y contribuyen al mantenimiento de la salud humana proporcionando oportunidades de enriquecimiento espiritual, desarrollo cognitivo, recreación y experiencias estéticas (De Groot *et al.*, 2002).

De acuerdo con la FAO (2020), se pueden distinguir cuatro tipos de servicios ecosistémicos: *De abastecimiento*: son los beneficios materiales que las personas obtienen de los ecosistemas, por ejemplo, el suministro de alimentos, agua, fibras, madera y combustibles; *de regulación*: son los beneficios obtenidos de la regulación de los procesos ecosistémicos, por ejemplo, la regulación de la calidad del aire y la fertilidad de los suelos, el control de las inundaciones y las enfermedades y la polinización de los cultivos; *De apoyo*: son necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos, por ejemplo, ofreciendo espacios en los que viven las plantas y los animales, permitiendo la diversidad de especies y manteniendo la diversidad genética; *Culturales*; son los beneficios inmateriales que las personas obtienen de los ecosistemas, por ejemplo, la fuente de inspiración para las manifestaciones estéticas y las obras de ingeniería, la identidad cultural y el bienestar espiritual.

Por otra parte, se pueden distinguir cuatro tipos de servicios ecosistémicos Millennium Ecosystem Assessment (MA, 2005): **Servicios de aprovisionamiento**: son los bienes que se pueden extraer y consumir de los ecosistemas y a menudo se valoran en los mercados: por ejemplo, agua, alimentos, madera y biocombustibles; **Servicios reguladores**: son los beneficios derivado de procesos ecosistémicos que modulan las condiciones que experimentamos, tales como la regulación del clima, la fertilidad del suelo o inundaciones, raramente tienen mercados, y deben ser valorados indirectamente; **Servicios culturales**: son reales pero no beneficios físicos "intangibles" que surgen de las interacciones entre humanos y ecosistemas; **Servicios de apoyo o soporte**: son los procesos fundamentales del ecosistema tales como fotosíntesis, ciclo de nutrientes y evolución, que permiten la entrega de primeras tres categorías, y así encontrar beneficios sociales a través de ellas.

En los servicios ecosistémicos de soporte al ser considerados necesarios para la producción de otros servicios de los ecosistemas, son: Formación de suelos; Reciclaje de Nutrientes; y Producción primaria (MA, 2005).

Boerema *et al.* (2017), presenta una lista de servicios ecosistémicos de acuerdo con su término de búsqueda [Tabla 2]:

Tabla 2. Lista de servicios ecosistémicos

Servicios ecosistémicos	Término de búsqueda
Aprovisionamiento 1. Producción de alimentos 2. Provisión de agua 3. Materiales y material de fibra 4. Energía y energía de combustible 5. Recursos genéticos 6. Recursos medicinales 7. Recursos ornamentales	Alimentos; nutrición; pez. Agua; Bebiendo; riego. Fibra; madera; materia prima; madera. Biomasa combustible. Genéticos Medicina / medicinal. Ornamental.
Reguladores 8. Purificación de agua 9. Regulación del agua 10. Regulación de la calidad del aire 11. Regulación de la calidad del suelo 12. Retención del suelo 13. Regulación climática 14. Polinización 15. Mantenimiento del ciclo de vida 16. Control biológico	Purificación de agua; tratamiento de residuos de agua; nutriente de agua; calidad del agua. Regulación del agua; flujo de agua; cantidad de agua; prevención / atenuación de inundaciones; mitigación / prevención de sequías; protección contra tormentas; retención de agua. Calidad del aire; polvo fino (captura); contaminantes del aire; deposición seca. Calidad del suelo; formación del suelo; fertilidad del suelo; ciclo de nutrientes (nutrientes del suelo); meteorización; reciclaje; procesos microbianos; descomposición. Retención del suelo; erosión; sedimentación (conservación del suelo). Clima; carbón; secuestro; gas. Polinización. Mantenimiento del ciclo de vida; vivero / viveros Control biológico; parásito.
Cultural 17. Recreación y turismo 18. Servicios científicos y educativos 19. Patrimonio, Cultural, Legado, Inspiración y Patrimonio del Arte 20. Servicios de estética 21. Servicios simbólicos, sagrados, espirituales y religiosos	Recreación; turismo; entretenimiento; amenidad. Ciencia; científico; educación; desarrollo cognitivo. Cultural; legado; inspiración; arte. Estética; bienestar. Simbólicos; sagrado; espiritual; religión.

Fuente: Elaboración propia con base en Boerema et al. (2017).

De acuerdo con Zeski (2020), menciona que existen algunas tipologías ampliamente reconocidas de los servicios ecosistémicos, los cuales se clasifican en cuatro categorías con pequeñas diferencias, siendo las siguientes:

Servicios de aprovisionamiento: describen las salidas de material o energía directamente derivadas de especies de plantas cultivadas o los productos obtenidos del ecosistema. Incluyen productos, como alimentos, agua dulce, materia prima (madera, combustible, biocombustibles y productos no madereros), y recursos medicinales (bioquímicos, medicinas naturales y productos farmacéuticos).

Servicios de regulación: se refieren a los beneficios que se obtienen de la regulación de los procesos del ecosistema, incluyendo regulación climática con secuestro de carbono, calidad del aire y moderación extrema de eventos, control biológico con regulación de enfermedades, prevención de erosión con mantenimiento del suelo fertilidad, polinización, purificación de agua, tratamiento de residuos y control de inundaciones.

Servicios de apoyo o soporte: son generales y necesarios para la producción de otros ES, estos incluyen nutrientes, producción de oxígeno, formación del suelo, hábitat para especies, diversidad genética y primaria producción.

Servicios culturales: son los beneficios no materiales que las personas obtienen de los ecosistemas a través de enriquecimiento espiritual, desarrollo cognitivo, reflexión, recreación y experiencias estéticas. Son los valores perceptivos que la gente inspira de las diversas funciones del ecosistema. Incluyen experiencias recreativas, mantenimiento y rejuvenecimiento mental y físico, salud, apreciación estética, patrimonio cultural, valores educativos, inspiración para la cultura, el arte y diseño, ecoturismo, experiencia espiritual, valores religiosos y sentido del lugar.

Por otra parte, de acuerdo con Balvanera *et al.* (2017), los servicios ecosistémicos de soporte son los siguientes:

Regulación del clima (Carbón acciones y consumo): Mediado por carbono almacenado en vegetación, tomado de la atmósfera vía fotosíntesis.

Regulación de marino y agua dulce de calidad: Puede verse afectado por nutrientes (fósforo y nitrógeno), sedimento, orgánico disuelto contenido de carbón, temperatura, pH, y concentraciones de patógenos o compuestos tóxicos, el abiótico y componentes bióticos de los ecosistemas pueden contribuir a mitigar contaminantes.

Regulación de fertilidad del suelo: Características de suelos que sostienen la cantidad de nutrientes disponibles para la agricultura forrajes, silvicultura y producción de biocombustibles.

Regulación de la erosión del suelo: Características de un paisaje, tierra cubierta y suelos que regular la cantidad de pérdida de suelo impulsada por lluvia y reducir la cantidad de sedimentos acumulado en infraestructura hidráulico.

Regulación de inundación: Función de la vegetación y suelos, aumento de tasas de infiltración para reducir la cantidad de superficie de flujo de agua que contribuye a inundaciones.

Costero protección: Los hábitats costeros puede servir como escudos naturales contra olas, tormentas y viento que puede conducir a la infraestructura pérdida, inundación y erosión.

Control de plagas: Insectos, murciélagos y las aves regulan la abundancia de plagas agrícolas.

A través del tiempo la clasificación de los servicios ecosistémicos ha presentado diferentes tipologías. Para el caso de estudio los servicios ecosistémicos de captura de carbono y recarga de acuíferos se encuentran clasificados en los de soporte porque son procesos fundamentales de los ecosistemas de los cuales el ser humano obtiene beneficios directos e indirectos.

1.7.1 Captura de Carbono

La captura de carbono generada por los ecosistemas forestales permite comprender la importancia que tienen los bosques para los seres vivos. Para el caso de estudio el análisis del servicio ecosistémico de captura de carbono en un periodo de tiempo permite identificar si han existido cambios positivos o negativos.

El cambio climático global asociado al aumento potencial de la temperatura superficial del planeta, es uno de los problemas ambientales más severos que se enfrentan en el presente siglo. Este problema se acentúa por el rápido incremento actual en las emisiones de gases de efecto invernadero "GEI" (Bolin *et al.*, 1986) y por las dificultades de reducir en forma sustantiva el incremento de GEI en el futuro próximo (IPCC, 1995).

El dióxido de carbono y otros gases con efecto invernadero afectan directamente a los procesos biológicos en los árboles y, en general, a la ecología de los ecosistemas forestales (Karnosky *et al.*, 2001). El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los GEI más importantes y que su emisión a la atmósfera por el cambio en el uso del suelo ocupa el segundo lugar a nivel mundial con una fuerte contribución de las zonas tropicales (Dixon *et al.*, 1994).

Los bosques juegan un papel primordial en el ciclo de carbono al absorber y retener CO₂ atmosférico, el cual en parte fluye de nuevo a la atmósfera en los procesos de respiración autotrófica (en la vegetación) y heterotrófica (en el suelo) [Pardos, 2010]. Los bosques de México pueden ser extremadamente vulnerables al cambio climático (Villers y Trejo, 1998) y la capacidad de almacenamiento de carbono (C) en estos bosques se está perdiendo rápidamente por los procesos de deforestación y degradación de los ecosistemas forestales (Benjamín y Masera, 2001).

De acuerdo con Jenkins y Schaap (2018), los bosques juegan un papel clave dentro del ciclo global del carbono, eliminando el dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera y convertirlo en madera a medida que crecen y liberar dióxido de carbono a la atmósfera cuando los árboles se queman o se pudren, el sector forestal actúa como fuente o un sumidero de carbono, con el potencial de secuestrar carbono y así reducir el CO₂, los bosques y la madera que producen secuestran y almacenan más carbono que otros ecosistemas terrestres.

La importancia de los servicios de los ecosistemas forestales ha sido cada vez más reconocida, están surgiendo iniciativas dirigidas a conservar la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas, aún existen lagunas de conocimiento sobre sus relaciones y posibles compensaciones en los bosques,

las funciones y los servicios del ecosistema desempeñarán papeles importantes en el desarrollo del manejo forestal sostenible (Mori *et al.*, 2017).

Los ecosistemas contribuyen a la mitigación debido a su capacidad para eliminar el carbono del ambiente y almacenarlo (Locatelli, 2016). Los ecosistemas forestales juegan un papel crucial en el secuestro del carbono, particularmente de bosques tropicales, pero la deforestación tropical causa el aumento de emisiones de carbono (Locatelli, 2016).

Referido lo anterior, la importancia de conservar, proteger y restaurar los ecosistemas forestales a través de programas como son los Pagos por Servicios Ambientales permite mejorar la calidad de vida de los seres humanos generando los bosques mayor captura de carbono.

Conforme aumenta el deterioro ambiental, también crece la preocupación en grandes sectores de la población por encontrar herramientas para revertir estas tendencias negativas, tomando en cuenta los problemas sociales y económicos específicos de cada sociedad. Los programas de captura de carbono en bosques son instrumentos con enorme potencial para contribuir a la transición hacia el desarrollo sustentable (Yáñez, 2004) y para proponer estrategias viables dirigidas a la mitigación del cambio climático es imprescindible, conocer la dinámica del carbono en los ecosistemas forestales y las modificaciones a los flujos de carbono derivadas de los patrones de cambio de uso de suelo (Benjamín y Masera, 2001).

El análisis de estudio de la presente investigación se enfoca en la captura de carbono como un proceso que beneficia indirectamente al ser humano. A continuación se presentan investigaciones relacionadas al cálculo de la captura de carbono.

Almacenamiento carbono y la captura de CO₂ como servicios ecosistémicos de la cuenca del río Mucujún a través de establecimiento de parcelas permanentes, se realizaron pruebas de densidad de la madera para especies presentes en los bosques de la cuenca del río Mucujún, se midió la biomasa aérea para individuos con diámetros ≥ 10 cm de $(126,64 \pm 0,2731 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1})$, permitiendo así estimar el carbono almacenado en $(63,32 \pm 0,1365 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1})$ y de captura de CO₂

($228,71 \pm 0,5009 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$), valores que están dentro de los rangos en otros estudios (Ramírez *et al.*, 2016).

De acuerdo con Raj (2018), el rápido aumento de la producción ganadera ha provocado impactos ambientales, como la deforestación, la pérdida de biodiversidad, la degradación del suelo y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), por lo que establecieron 12 parcelas de muestreo en áreas forestales y potreros para evaluar el carbono en biomasa viva aérea, biomasa de raíces, hojarasca, madera muerta y carbono orgánico del suelo, el promedio de almacenamiento de carbono en áreas forestales fue ($144.45 \text{ Mg} \cdot \text{C} \cdot \text{ha}^{-1}$) comparado con ($75.95 \text{ Mg} \cdot \text{C} \cdot \text{ha}^{-1}$) en los potreros, el almacén de carbono en biomasa viva, fue más alto en áreas forestales que en potreros, pero no hubo diferencia significativa en el reservorio de carbono orgánico del suelo.

El secuestro de carbono a través de los bosques es un importante aspecto en la mitigación del cambio climático global, la valuación del carbono en los bosques mediante teledetección y las herramientas SIG son uno de los aspectos más importantes de metodologías rápidas y verificables, estudios han demostrado la utilidad de la espectral (vegetación) índices como el NDVI en la evaluación del carbono forestal, sin embargo, hay limitaciones para este enfoque, como por ejemplo la topografía montañosa y alta biodiversidad afectan los valores espectrales en píxeles de múltiples maneras. El artículo tiene como objetivo probar la validez del uso de la vegetación índices en bosques de alta biodiversidad en montañas modelando la medición de carbono forestal en tierra con índices de vegetación de NDVI, EVI, SAVI y MSAVI en un entorno de datos multi-sensor y multi-temporada con métodos de regresión múltiple como lineal, potencia, logarítmica, polinómica y exponencial (Kummar y Ghose, 2017).

Servicios ecosistémicos en la región VI Ixtapan de la sal, estado de México, el propósito fue analizar la pérdida de producción de los servicios ecosistémicos almacenamiento de carbono y retención del suelo, los insumos utilizados fueron cartas de Uso de suelo y vegetación del INEGI, los resultados obtenidos indican que los ecosistemas en toda la región se encuentran amenazados debido a las actividades económicas que en ella se desarrollan, siendo la florícola el factor de presión más significativo (Flores, 2018).

1.7.2 Recarga de acuíferos

La recarga hídrica permite comprender la importancia que tiene la precipitación e infiltración del agua a los mantos acuíferos. Para el caso de estudio, el análisis del servicio ecosistémico de recarga de acuíferos en un periodo de tiempo permite identificar si han existido cambios positivos o negativos, además de localizar las zonas bajas, medias y altas de recarga de agua subterránea.

Se define como acuífero a la roca o sedimento que pertenece parcial o totalmente a una o a varias formaciones, suficientemente permeable y saturada de agua para transmitirla en cantidades económicas hacia pozos o manantiales. En latín, acuífero significa: *aquí* viene de *aqua* que significa agua, y *fer* de *ferre* que significa llevar (Caudillo, 2008).

El agua subterránea es agua subsuperficial que ocupa vacíos presentes en formaciones geológicas, y constituye una de las fases o etapas del ciclo del agua. La cantidad de agua subterránea almacenada en las formaciones geológicas la facilidad con la cual puede extraerse depende de dos factores físicos: la porosidad y la permeabilidad (Vásquez, 2019).

La recarga se puede definir como la entrada de agua dentro de la zona saturada donde comienza a hacer parte de las reservas subterráneas, esta entrada puede darse de dos maneras, por un movimiento descendente del agua debido a las fuerzas de gravedad y luego de presentarse un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo (Balek, 1988).

La recarga a un acuífero puede darse naturalmente debido a la precipitación, a las aguas superficiales, es decir, a través de ríos y lagos, o por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos; pero también puede darse de manera artificial producto de actividades como la irrigación, fugas de redes de abastecimiento o por infiltraciones de embalses y depósitos (Balek, 1988; Lerner, 1990; Simmers, 1990; Custodio, 1997).

De acuerdo con Lerner (1990), las fuentes de recarga son:

Recarga directa o recarga difusa: proveniente del agua lluvia.

Recarga concentrada o indirecta: producto de cauces permanentes, estación.

Retorno de riegos: excesos de riegos o las pérdidas en los canales de distribución.

Recarga Urbana: producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado.

Los bosques y los árboles en el paisaje son un componente integral del ciclo del agua: regulan flujo de corriente, fomentando la recarga de agua subterránea, actúan como filtros naturales, reduciendo la erosión del suelo y la sedimentación de agua, proporcionando así una alta calidad agua para consumo humano, industria y medio ambiente (Springgay *et al.*, 2019).

Los beneficios que los bosques proporcionan a la sociedad se denominan servicios ecosistémicos del agua de los bosques, que son importantes para mantener ecosistemas, paisajes y comunidades saludables (Springgay *et al.*, 2019).

Los ecosistemas influyen en el funcionamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas a través de su contribución a intercepción de lluvia, evapotranspiración, infiltración de agua y recarga de agua subterránea, los ecosistemas pueden preservar los flujos base durante las estaciones secas si facilitan la recarga del agua subterránea, también puede reducir los flujos máximos o las inundaciones durante los eventos de lluvia si contribuyen a la intercepción de la lluvia e infiltración (Locatelli, 2016).

Referido lo anterior, al poniente del Estado de México la conservación y restauración de espacios forestales permitirá obtener mejores niveles de recarga de agua subterránea mejorando la calidad de vida del ser humano.

Los servicios hidrológicos incluyen la regulación de caudales para mitigar inundaciones, la recarga de acuíferos que mantienen caudales durante la época seca, la purificación del agua y el control de la erosión (MEA, 2005).

La sobreexplotación ocurre cuando la extracción de agua subterránea es intensiva, por ejemplo para riego o para el suministro directo de agua industrial como extracción de combustibles fósiles (Foster *et al.*, 2013; Pettenati *et al.*, 2013). Cuando el agua subterránea está continuamente sobre-bombeado, año tras año, el volumen retirado del acuífero no puede ser reemplazado por recarga.

Finalmente, el nivel del agua subterránea es mucho más bajo que su nivel inicial e incluso cuando se detiene el bombeo, el acuífero tiene problemas para volver a subir el nivel original (Casanova *et al.*, 2016).

Por otra parte, de acuerdo con Vásquez (2019), la recarga puede determinarse por varios métodos, y se clasifican en 5 grupos.

Medidas directas: La recarga se mide directamente mediante la construcción de lisímetros.

Balance hídrico: Se determinan los flujos de entrada y de salida de un sistema, y la recarga al acuífero constituye el residuo de la ecuación de balance hídrico.

Trazadores: Su principal uso es determinar fuentes de recarga y zonas de descarga aunque se utilizan para cuantificar la recarga a través de un balance de masa del trazador.

Aproximaciones de Darcy: Se encuentran valores de cabezas hidráulicas a partir de las ecuaciones de flujo de Richards y Boussinesq y luego se determina la velocidad de filtración.

Empíricos: Consiste en el desarrollo de ecuaciones empíricas que relacionan la recarga con alguna variable como la precipitación.

La investigación se enfoca en el análisis del servicio ecosistémico de soporte recarga de acuíferos, como un proceso que beneficia directamente al ser humano. A continuación se presentan investigaciones relacionadas al cálculo de la recarga de acuíferos.

La identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la subcuenca del Río Tzunutz, se realizó a través de los insumos imágenes raster, junto con el uso de los sistemas de información geográfica, los resultados muestran que las zonas con potencial muy alto y alto requieren medidas de protección y conservación apropiadas (Coy, 2015).

Identificación de zonas de recarga hídrica en la microcuenca del Río Negro, Ciudad de Guatemala, el propósito fue aportar procesos de planificación e investigación de la Municipalidad de Guatemala para el manejo de los recursos hídricos locales, los insumos utilizados fueron datos de pendiente, tipo de suelo,

roca, cobertura vegetal y uso de la tierra, los resultados obtenidos muestran que la microcuenca presenta cuatro potenciales de recarga hídrica, los cuales, son: alto, moderado, bajo y muy bajo que cubren un área de (3.63%), (19.57%), (20.25%) y (56.38%) respectivamente del área total, lo cual, significa que existe un potencial bajo de recarga hídrica (Donis, 2015).

Aplicación de varias metodologías para estimar la recarga al acuífero pampeano, Argentina, el propósito fue evaluar la recarga vertical por precipitación al acuífero del Azul, los insumos utilizados fueron datos de precipitación media anual y temperatura media anual, los resultados obtenidos muestran que la variación temporal de la recarga varía entre más del (20%) de la precipitación media anual en la cuenca superior a menos del (10%) en la llanura (cuenca baja), con valores intermedios para la subcuenca media (Varni, 2013).

Identificación de sitios potenciales de recarga de acuíferos mediante uso de vehículos aéreos no tripulados en la Universidad del Mar campus Puerto Ángel, el propósito fue identificar la zona de recarga de acuíferos dentro del campus Puerto Ángel, los insumos utilizados fueron fotografías aéreas tomadas por el vehículo no tripulado (VANT), los resultados sugieren que el (24.5%) de esta superficie presenta aptitud alta y muy alta como área de recarga e infiltración al acuífero (Ramírez *et al.*, 2018).

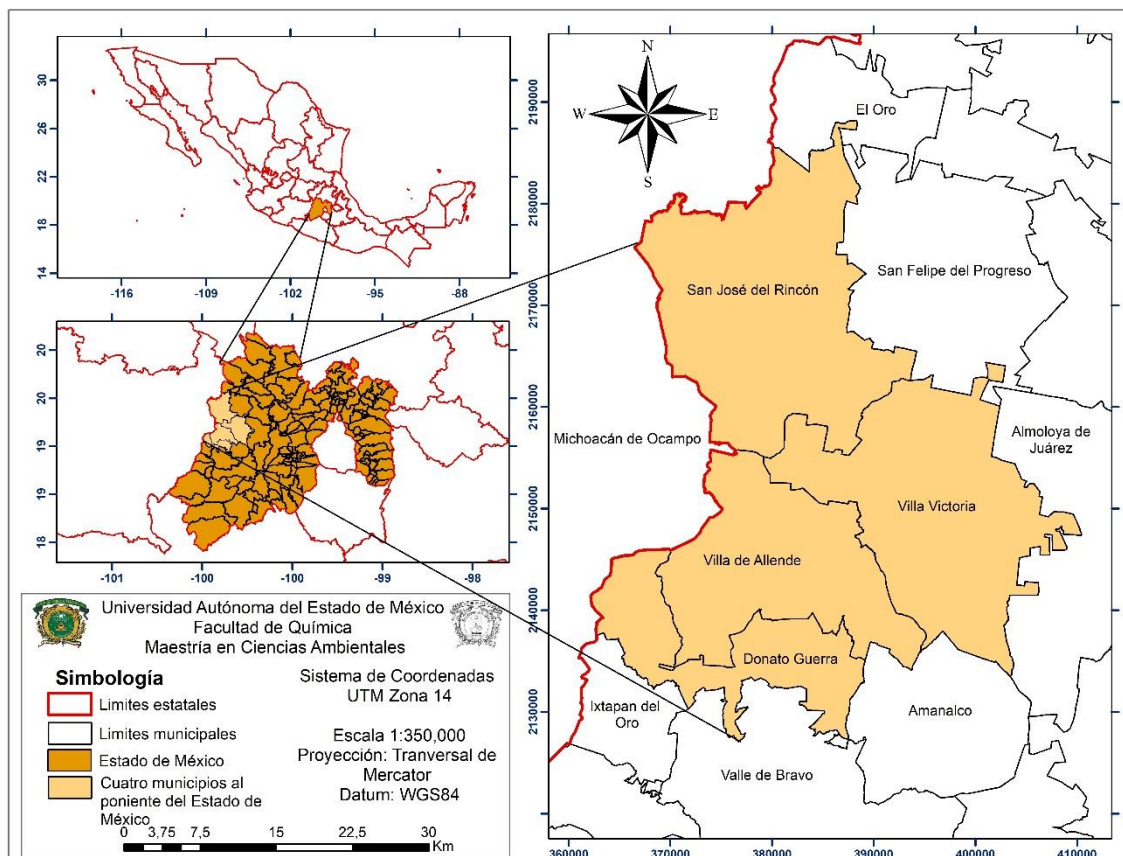
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

El área de estudio incluye cuatro municipios que se localizan al poniente del estado de México: Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria, la ubicación geográfica va desde los 19° 18' 30" y 19° 29' 41" de latitud Norte y los 99° 51' 43" y 100° 8' 55" de longitud Oeste; este espacio geográfico tiene una superficie de 141,340 ha.

Desde una perspectiva político-administrativa, limita al norte con el municipio de El Oro, al este con los municipios de San Felipe del Progreso y Almoloya de Juárez, al sur con los municipios de Ixtapan del Oro, Valle de Bravo y Amanalco y al oeste con el estado de Michoacán de Ocampo (Mapa 1).

Mapa 1. Ubicación geográfica de cuatro municipios al poniente del estado de México



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2010).

2.2 Etapas metodológicas

2.2.1 Etapa metodológica 1. Caracterización geográfica y ambiental en cuatro municipios al poniente del Estado de México

Se elaboraron mapas, gráficos y tablas de elementos y componentes abióticos y socioeconómicos que pertenecen a cuatro municipios al poniente del Estado de México (Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria). Para determinar los elementos presentes del área de estudio, la caracterización se realizó a través de la consulta de información (trabajo de gabinete) del INEGI y CONABIO.

La consulta de gabinete referente a los elementos y componentes abióticos consistió en: fisiografía, elevaciones, clima, hidrografía, precipitación media anual y edafología. Los elementos y componentes socioeconómicos se fundamentó en: número de habitantes, porcentaje del incremento de población, densidad de población, población económicamente activa e inactiva, población alfabetizada y analfabetizada, migración de la población, población derechohabiente y no derechohabiente y total de viviendas.

Una vez obtenidas las bases de datos, se realizó la depuración de datos con información de la población y de los elementos y componentes abióticos (naturales) del área de estudio, los datos fueron descritos y representados espacialmente a través del software Arc Gis 10.2.2.

2.2.2 Etapa metodológica 2. Descripción de los ecosistemas terrestres en cuatro municipios al poniente del Estado de México

Los insumos utilizados para la descripción de los ecosistemas mediante SIG, fueron imágenes satelitales de los sensores Landsat 7 ETM del año 2000 y Landsat 8 OLI/TIRS del año 2018, recuperadas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2018).

2.2.2.1 Identificación de los ecosistemas presentes

Previo a la identificación de los ecosistemas, se especificaron las categorías que corresponden al área de estudio, estas categorías fueron seleccionadas de acuerdo a los criterios de identificación establecidos por Pauleit *et al.*, (2005).

La elaboración de la cartografía de los ecosistemas se llevó a cabo a partir de las fases metodológicas de Clasificación y Post-clasificación. A continuación se describe cada una de ellas.

2.2.2.2 Clasificación

Para realizar la clasificación se utilizó un método híbrido combinando un proceso de clasificación supervisada e interdependiente para las coberturas y usos del suelo. De acuerdo con Mas *et al.* (2017), un método híbrido de clasificación es la combinación de un procesamiento digital e interpretación visual que permite generar mapas de diferentes fechas con base en procesos de mejora de la escala de cartografía.

Las categorías de: bosque, cuerpos de agua, asentamientos humanos, agricultura de riego, agricultura de temporal, pastizales y suelos desprovistos de vegetación; se procesaron mediante clasificación supervisada a través de las siguientes fases metodológicas:

Delimitación de los campos de entrenamiento:

La delimitación de los campos de entrenamiento se realizó con base en la regla general establecida por Jensen (1996), que consiste en seleccionar como mínimo 10 veces el número de bandas utilizadas para calibrar el clasificador. Para identificar los ecosistemas se utilizaron tres bandas espectrales dirigidas a generar un compuesto de falso color para cada año. Para el año 2018 se utilizaron las bandas 5, 3,2 de la escena Landsat OLI/TIRS; para el año 2000 se ocuparon las bandas 4, 3,2 de la escena Landsat 7 ETM.

Posteriormente se digitalizaron 500 campos de entrenamiento para cada año (2000 y 2018), teniendo como mínimo 25 campos para cada clase distribuidos de manera aleatoria estratificada.

Firmas espectrales y análisis de separabilidad:

De acuerdo con García y Mas (2008), los píxeles de cada campo de entrenamiento generan las firmas espectrales, a través de histogramas que representan el promedio de los valores radiométricos de cada categoría delimitada. La creación de firmas espectrales se realizó a través de la

herramienta Multivariate, que retoma los valores de los campos de entrenamiento anteriormente establecidos.

Método de clasificación:

Se realizó la clasificación supervisada de las imágenes satelitales de los años 2000 y 2018 a través de una clasificación puntual y con el algoritmo de máxima verosimilitud (Maximum likelihood Classification). El algoritmo automáticamente clasificó el área de estudio de acuerdo con el tipo de píxel que presenta reflectancia de un color del píxel respecto a los demás, identificando así cada categoría establecida. De acuerdo con Buendía *et al.* (2002), esta es calificada como la mejor opción para identificar las clases del uso del suelo y vegetación y este algoritmo considera los parámetros de clasificación previamente calculados (clasificador calibrado) para etiquetar cada píxel de la imagen en una de las clases definidas (Lira, 2010).

Clasificación interdependiente:

Con el fin de desagregar la cobertura forestal por ecosistema identificada dentro del área de estudio, se utilizó una clasificación interdependiente que consistió en digitalizar los polígonos de cada una de estas coberturas en los compuestos de falso color, para los años 2000 y 2018. Estos fueron obtenidos de las imágenes satelitales Landsat ETM del año 2000 y Landsat OLI del año 2018, lo que permitió evitar errores de confusión entre estas clases. Las fases metodológicas se realizaron en el software ArcGis 10.2.2.

2.2.2.3 Post-clasificación:

En esta fase se validaron los mapas de los ecosistemas para los años 2000 y 2018. El proceso de evaluación de la confiabilidad temática se dividió en tres fases: a) diseño de muestreo, b) evaluación de los sitios de verificación y c) análisis de los datos (Mas *et al.*, 2003).

Diseño de muestreo:

Esta fase consta de tres etapas en las que se establecen las unidades de muestreo, el método de muestreo y el tamaño de la muestra (Camacho, 2016).

Para el caso de estudio, la unidad de muestreo que se utilizó fue el punto, el método de muestreo utilizado fue aleatorio estratificado que permite tener control

sobre la colocación de los sitios de muestreo. El tamaño de la muestra fue establecida mediante dos perspectivas, la primera con base en Congalton (1988, 1991), que sugiere verificar por lo menos 50 sitios por categoría y la segunda con base a los parámetros establecidos por Mas y Couturier (2011), donde mencionan que para obtener una fiabilidad global del 80% y un medio intervalo de confianza de 5%, se deben aplicar 247 sitios de verificación. Para el presente estudio se registraron 900 puntos de muestreo para la validación de los mapas correspondientes a los años 2000 y 2018, digitalizando 100 puntos por cobertura, para las 9 categorías (Tabla 3).

Tabla 3. Tamaño por categoría

P *	90	80	70	60	50
2.5	553	983	1291	1475	1535
5.0	138	246	323	369	384
10	35	61	81	92	96

Fuente: Mas y Couturier (2011).

Donde:

P= Confiabilidad estimada.

*= Medio intervalo de confianza

Evaluación de los sitios de verificación

En esta fase se relacionaron los puntos de muestreo anteriormente registrados con varias categorías cuyas leyendas se observan en los mapas de los ecosistemas. Para realizar la valoración de los sitios de verificación correspondientes a la cobertura forestal para los años 2000 y 2018 se utilizaron como insumos la serie III del año 2003 y la serie VI del año 2017 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Adicionalmente se registraron puntos de verificación “*in situ*” mediante el uso del GPS, relacionándolos con los píxeles clasificados en los mapas.

Para evaluar los ecosistemas que no presentan cobertura forestal los procesos se realizaron a través de imágenes de alta resolución espacial de Google Earth para ambos años (Congalton *et al.*, 1998), con el fin de relacionarlos posteriormente con los píxeles clasificados en los mapas.

Análisis de los datos:

Esta fase consistió en elaborar una matriz de confusión o matriz de error para los años 2000 y 2018, la cual permite contrastar la información de los sitios de verificación con los mapas de uso de suelo y vegetación que fueron valorados. La matriz está integrada por filas que representan las clases de referencia, las columnas significan las categorías del mapa y la diagonal constituye el número de sitios o puntos de verificación para los cuales hay relación entre los datos de referencia y las categorías del mapa, mientras los marginales representan los errores de asignación (Mas *et al.*, 2003; Mas y Couturier, 2011) [Tabla 4].

Tabla 4. Matriz de confusión o error

Verdad terreno (Clases de referencia= i)	Verdad imagen (Categorías del mapa = j)				Total
	j_1	j_2	...	j_q	
i_1	$i_1 j_1$	$i_1 j_2$	...	$i_1 j_q$	i_{1+}
i_2	$i_2 j_1$	$i_2 j_2$	...	$i_2 j_q$	i_{2+}
...
i_q	$i_q j_1$	$i_q j_2$	...	$i_q j_q$	i_{q+}
Total	$+ j_1$	$+ j_2$	...	$+ j_q$	$\sum i_+$ $\sum +j$

Fuente: Mas *et al.* (2003); Mas y Couturier (2011).

Donde:

ij = Representa el número de puntos (superficie) correctamente clasificados de cada categoría.

i_{1+} = Es la suma de los puntos (superficie) correspondientes a la clase de referencia i_1 .

$+j_1$ = Corresponde a la suma de los puntos (superficie) de la categoría del mapa j_1 .

$\sum i_+$ o $\sum +j$ = Es el total de la suma de los puntos de las clases de referencia ($\sum i_+$), o bien, el total de la suma de los puntos correspondientes a las categorías del mapa ($\sum +j$).

Posteriormente, a través de los datos derivados de la matriz de confusión, se ejecutó el cálculo de los índices de fiabilidad y el medio-intervalo de confianza para cada uno de los mapas 2000 y 2018, considerando como mínimo una fiabilidad estimada del 80% (Stehman y Czaplewski, 1998) [Tabla 5].

Tabla 5. Ecuaciones para determinar los índices de fiabilidad y el medio – intervalo de confianza

Indicador	Expresión matemática	Descripción
Confiabilidad global o exactitud general	$P_c = (\sum P_{ij} / \sum P_{+j} \text{ o } P_{i+}) * 100$	Es la proporción de puntos (superficie) correctamente clasificados en los mapas, producto de la interpretación de imágenes de satélite. El coeficiente derivado de su cálculo representa la probabilidad para cualquier sitio en el mapa de ser correctamente clasificado.
Medio – intervalo de confianza	$B = z_{\alpha/2} \sqrt{p(1-p) / n}$	Corresponde al error de la estimación precisa de la fiabilidad del mapa. Dónde: $z_{\alpha/2}$ es el valor que separa a un área de $\alpha/2$ en la cola del lado derecho de la distribución normal estándar (el valor de $z_{\alpha/2}$ en este estudio corresponde a 1.96); p es la fiabilidad esperada; y n corresponde al tamaño de la muestra.
Error de comisión	$E_c = (1 - (P_{ij} / P_{+j})) * 100$	Indica la proporción de sitios de verificación cartografiada en una cierta clase j , pero que en realidad pertenecen a otra categoría.
Error de omisión	$(E_o) = (1 - (P_{ij} / P_{i+})) * 100$	Representa la proporción de sitios de verificación correspondientes a una categoría j que fue cartografiada en otra.
Confiabilidad del usuario	$C_u = (P_{ij} / P_{+j}) * 100$	Se interpreta como la probabilidad que un sitio clasificado como j y aleatoriamente seleccionado sea realmente j en el terreno.
Confiabilidad del productor	$C_p = (P_{ij} / P_{i+}) * 100$	Es la proporción de sitios de verificación de la clase j que están representados en el mapa o en la base de datos como tal.

Fuente: Stehman y Czaplewski (1998); Mas et al. (2003); Mas y Couturier (2011); Camacho et al. (2015); y Camacho (2017).

Previamente al desarrollo de los índices de fiabilidad y el medio-intervalo de confianza, se ejecutó la corrección de las matrices de confusión generada, de acuerdo al método de muestreo que se utilizó en la investigación (aleatorio estratificado). Se observó que el número de sitios por categoría no es proporcional a la superficie representada para cada una de estas clases, por lo que el resultado no debe ser explicado de esta manera (Mas et al., 2003).

La corrección se elaboró a través del método planteado por Card (1982), ponderando el número de sitios de verificación en correlación con la superficie de cada una de las clases establecida en los mapas de uso de suelo y vegetación. Mediante este método se desarrollaron matrices de confusión expresadas en proporción; en relación con los datos que integran estas, se

estimó la proporción y la superficie de cada una de las clases de análisis (Tabla 6).

Tabla 6. Matriz de confusión expresada en proporción

Verdad terreno (Clases de referencia = i)	Verdad imagen (Categorías del mapa = j)				
	j_1	j_2	...	j_q	Total
i_1	$P_{i_1 j_1}$	$P_{i_1 j_2}$	...	$P_{i_1 j_q}$	P_{i_1+}
i_2	$P_{i_2 j_1}$	$P_{i_2 j_2}$	...	$P_{i_2 j_q}$	P_{i_2+}
...
i_q	$P_{i_q j_1}$	$P_{i_q j_2}$	...	$P_{i_q j_q}$	P_{i_q+}
Total	P_{+j_1}	P_{+j_2}	...	P_{+j_q}	ΣP_{+j} ΣP_{i+}

Fuente: Mas et al. (2003).

Donde:

P_{ij} = Proporción de puntos (superficie) correctamente clasificados de cada categoría o clase.

P_{i1+} = Es la suma de las proporciones de los puntos (superficie) correspondientes a la clase de referencia i_1 .

P_{+j1} = Corresponde a la suma de las proporciones de los puntos (superficie) de la categoría del mapa j_1 .

ΣP_{+j} o ΣP_{i+} = Es el total de la suma de las proporciones de los puntos de las clases de referencia (ΣP_{i+}), o bien, el total de la suma de las proporciones de los puntos correspondientes a las categorías del mapa (ΣP_{+j}).

2.2.2.4 Dinámica de los cambios de cobertura y uso del suelo

Matriz de cambios o tabulación cruzada:

La dinámica de cambios ocurridos en los ecosistemas, se obtuvo a través de la construcción de una matriz de cambios o tabulación cruzada, misma que fue elaborada a partir de los mapas de los ecosistemas presentes para los años 2000 y 2018.

La tabla 7 representa la matriz de cambios, la que es una tabla bidimensional, donde las columnas representan el área de las categorías cartografiadas en el mapa correspondiente a la fecha 1 (f_1). Las filas contienen la superficie de las categorías de la fecha 2 (f_2), finalmente la diagonal principal representa la persistencia, que es el área conservada de cada una de las categorías durante el periodo de análisis (f_1 y f_2) [Pontius *et al.*, 2004; Camacho-Sanabria 2019].

Tabla 7. Matriz de cambios o tabulación cruzada

		Fecha 1 (f_1)				
		Categoría 1 (f_1)	Categoría 2 (f_1)	Categoría 3 (f_1)	Categoría n (f_1)	Total (f_2)
Fecha 2 (f_2)	Categoría 1 (f_2)	Categoría 1 (f_1) Categoría 1 (f_2)	Categoría 2 (f_1) Categoría 1 (f_2)	Categoría 3 (f_1) Categoría 1 (f_2)	Categoría n (f_1) Categoría 1 (f_2)	Total Categoría 1 (f_2)
	Categoría 2 (f_2)	Categoría 1 (f_1) Categoría 2 (f_2)	Categoría 2 (f_1) Categoría 2 (f_2)	Categoría 3 (f_1) Categoría 2 (f_2)	Categoría n (f_1) Categoría 2 (f_2)	Total Categoría 2 (f_2)
	Categoría 3 (f_2)	Categoría 1 (f_1) Categoría 3 (f_2)	Categoría 2 (f_1) Categoría 3 (f_2)	Categoría 3 (f_1) Categoría 3 (f_2)	Categoría n (f_1) Categoría 3 (f_2)	Total Categoría 3 (f_2)
	Categoría n (f_2)	Categoría 1 (f_1) Categoría n (f_2)	Categoría 2 (f_1) Categoría n (f_2)	Categoría 3 (f_1) Categoría n (f_2)	Categoría n (f_1) Categoría n (f_2)	Total Categoría n (f_2)
	Total (f_1)	Total Categoría 1 (f_1)	Total Categoría 2 (f_1)	Total Categoría 3 (f_1)	Total Categoría n (f_1)	SUMA DE LOS TOTALES

Fuente: Pontius et al. (2004); Camacho-Sanabria (2019).

Indicadores e índices de cambio:

La dinámica espacio-temporal de los cambios ocurridos en los ecosistemas, se obtuvo a través del cálculo de indicadores de cambios relativos a pérdidas, ganancias, cambios netos, cambio total e intercambios entre las diferentes clases (Pontius et al., 2004). Se establecieron los índices de Braimoh que permiten analizar las características de espacios geográficos estables en relación a pérdidas, ganancias y cambios netos por categoría (Braimoh, 2006) [Tabla 8].

Tabla 8. Indicadores e índices de cambio

Indicador	Expresión matemática	Descripción del indicador y variables
Pérdidas	$L_{ij} = P_{j+} - P_{jj}$	Es la diferencia entre la columna del total del tiempo1 (P_{j+}) y la persistencia (P_{jj}). Dónde: L_{ij} corresponde a las pérdidas, P_{j+} pertenece al total de cada categoría del tiempo1 y P_{jj} es la persistencia.
Ganancias	$G_{ij} = P_{+j} - P_{jj}$	Es la diferencia entre la fila del total del tiempo2 (P_{+j}) y la persistencia (P_{jj}). Dónde: G_{ij} corresponde a las ganancias, P_{+j} pertenece al total de cada categoría del tiempo2 y P_{jj} es la persistencia.
Cambio neto	$D_j = L_{ij} - G_{ij}$	Es la diferencia de las pérdidas y las ganancias de cada categoría. Dónde: D_j corresponde al cambio neto, L_{ij} pertenece a las pérdidas y G_{ij} es las ganancias.
Intercambios	$S_j = 2XMIN(P_{j+} - P_{jj}, P_{+j} - P_{jj})$	El concepto de intercambio implica pérdidas y ganancias simultáneas de una categoría sobre el territorio. Se calcula como dos veces el valor mínimo de las ganancias (G_{ij}), o bien, dos veces el valor mínimo de las pérdidas (L_{ij}) de cada categoría.
Cambio total	$C_j = D_j + S_j$	Se establece como la suma del cambio neto (D_j) y el intercambio (S_j), o también como la suma de las ganancias (G_{ij}) y las pérdidas (L_{ij}).
Índice de ganancia a persistencia	$G_p = G_{ij} / P_{jj}$	Dónde: G_p corresponde al índice de ganancia a persistencia, G_{ij} pertenece a las ganancias y P_{jj} es la persistencia.
Índice de pérdida a persistencia	$L_p = L_{ij} / P_{jj}$	Dónde: L_p corresponde al índice de pérdidas a persistencia, L_{ij} pertenece a las pérdidas y P_{jj} es la persistencia.
Índice de cambio neto a persistencia	$n_p = G_p - L_p$	Dónde: n_p corresponde al índice de cambio neto a persistencia, G_p pertenece al índice de ganancia a persistencia y L_p es el índice de pérdidas a persistencia.

Fuente: Pontius et al. (2004); Braimoh (2006); y Camacho (2017).

2.2.3 Etapa metodológica 3. Servicio ecosistémico de soporte captura de carbono en cuatro municipios al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018

Para la estimación de captura de carbono se retomaron los ecosistemas forestales que fueron obtenidos del método híbrido a través de la clasificación interdependiente (digitalización de polígonos) de mágenes satelitales Landsat ETM del año 2000 y Landsat 8 OLI del año 2018, con la finalidad de tener el menor número de errores entre los ecosistemas.

Posteriormente se definieron cada uno de los ecosistemas forestales presentes en cuatro municipios al poniente del Estado de México (Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria), se estimó la superficie en hectáreas de cada una de estas coberturas de bosque.

Para realizar la estimación de captura de carbono se retomaron los índices estimados por Díaz *et al.* (2007); Avendaño *et al.* (2009); y Jiménez *et al.* (2013); que establecieron el porcentaje de carbono que captura cada ecosistema forestal a partir de dos etapas:

Para el cálculo de los índices estos autores aplicaron el siguiente procedimiento: La primera etapa aplicada por ellos consistió en la biomasa obtenida a nivel de cada uno de los árboles por componente estructural (fuste, ramas, follaje y corteza) que fueron derribados para medir su altura lo que permitió a ellos obtener trozas de dimensiones comerciales y que en laboratorio se registró el peso seco de estas especies. Mediante la diferencia del peso seco y fresco ellos determinaron la humedad que se resto al peso fresco de las secciones del fuste y copa; así obtuvieron la biomasa por componente estructural del árbol.

En una segunda etapa estos autores aplicaron ecuaciones de biomasa por regresión mediante la relación del diámetro normal, altura total de biomasa individual y estimación de biomasa total que representa la suma de biomasa estimada por árbol, dentro de los estimadores fueron corteza, ramas y fuste respecto a la biomasa total. La proporción de la biomasa de los distintos componentes estructurales en los estudios analizados varió de acuerdo con las características de altura de los árboles.

En esta tesis para obtener el carbono capturado por cada ecosistema forestal se multiplicó el total de superficie en hectáreas (ha) de cada uno de los ecosistemas forestales por el índice correspondiente al tipo de cobertura forestal.

La tabla 9 muestra los índices de captura de carbono que establecen el porcentaje de carbono que captura cada ecosistema forestal (Díaz *et al.*, 2007; Avendaño *et al.*, 2009; y Jiménez *et al.*, 2013).

Tabla 9. Índices de captura de carbono por ecosistema forestal

Especie o tipo de vegetación	% Carbono
Bosque de Pino	50.31
Bosque mixto de Pino-Encino	47.98
Bosque de Oyamel	46.50

Fuente: Elaboración propia con base en Díaz *et al.* (2007); Avendaño *et al.* (2009); y Jiménez *et al.* (2013).

2.2.3.1 Validación “*in situ*” del estado y porte de los árboles en los ecosistemas forestales de los cuatro municipios al poniente del Estado de México

De acuerdo con Otzen y Manterola (2017), la técnica de muestreo no probabilística intencional permite seleccionar casos característicos de una población limitando la muestra sólo a estos casos, se utiliza en escenarios en las que la población es muy variable. Para el caso de estudio se utilizó la técnica de muestreo no probabilística intencional y en esta etapa se evaluó el diámetro y altura de 120 árboles en total que corresponden a 40 de oyamel, 40 de pino y 40 de encino. Estos tipos de árboles integran los ecosistemas forestales que se encuentran presentes en los municipios del área de estudio.

De acuerdo con Romahn y Ramírez (2010), la medición del diámetro normal o diámetro a la altura del pecho se refiere al diámetro con corteza que tiene el árbol a 1.30 m sobre el nivel del suelo. Para el caso de estudio la medición del diámetro de los árboles se realizó a la altura del pecho a 1.30 m sobre el nivel del suelo. La altura del árbol se midió de manera indirecta a través de una estimación visual de manera horizontal respecto al árbol por debajo de este mismo, lo que permitió obtener un promedio general de la altura de los árboles.

2.2.4 Etapa metodologica 4. Servicio ecosistémico de soporte recarga de acuíferos en cuatro municipios al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018

En cuatro municipios al poniente del Estado de México, es significativo conocer la importancia que presenta como zona de recarga hídrica porque permite el almacenamiento hacía los acuíferos. Para la estimación del agua que se infiltra se utilizaron los promedios medios anuales de temperatura y precipitación de los años 2000 y 2016 de 22 estaciones meteorológicas que se encuentran dentro y fuera del área de estudio (Tabla 10). Se elaboraron dos mapas de recarga hídrica para identificar las zonas de mayor y menor almacenamiento de agua infiltrada para los años 2000 y 2018, es importante mencionar que para el año 2018 se utilizaron datos de precipitación y temperatura media anual del año 2016.

Tabla 10. Precipitación y temperatura media anual al poniente del Estado de México 2000-2016.

No.	ESTACIÓN	X	Y	Z	PRECIPITACIÓN 2000	PRECIPITACIÓN 2016	TEMPERATURA 2000	TEMPERATURA 2016
1	15051	-99,86	19,42	2577	72,04	79,83	12,18	12,14
2	15066	-100,09	19,50	2635	68,39	36,72	11,17	11,86
3	15133	-100,05	19,46	2552	83,86	87,21	12,97	13,83
4	15140	-100,15	19,34	2365	83,53	76,44	14,30	14,78
5	15160	-99,94	19,4	2770	82,07	62,83	12,58	13,01
6	15197	-100,19	19,46	2750	40,78	48,82	16,94	16,86
7	15199	-99,94	19,55	2927	83,04	43,54	11,52	11,39
8	15205	-99,90	19,39	2616	61,63	63,65	12,52	13,40
9	15265	-100,07	19,38	2541	93,09	93,42	13,58	13,61
10	15378	-100,15	19,37	2383	73,66	77,04	13,47	13,95
11	15391	-100,06	19,45	2580	76,53	81,62	13,39	13,87
12	15070	-100,14	19,76	2929	72,75	86,62	9,99	12,66
13	15183	-100,12	19,8	2731	52,44	95,37	11,75	11,56
14	15128	-100,08	19,81	2601	55,85	57,97	13,81	14,05
15	15267	-100,04	19,71	2795	60,16	76,42	13,57	15,28
16	15233	-99,94	19,58	2910	77,36	36,96	13,71	13,49
17	15388	-99,9	19,5	2245	21,44	56,76	12,32	11,06
18	15174	-99,92	19,29	3000	48,00	78,75	10,77	13,03
19	15374	-99,95	19,26	2817	78,86	71,46	15,44	13,46
20	15165	-100,13	19,19	1948	77,73	54,70	18,75	19,18
21	16192	-100,39	19,41	1720	59,45	88,975	18,7	18,81
22	16121	-100,35	19,73	2260	79,56	72,23	16,08	16,12

Fuente: Elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional (2020).

Se utilizó la metodología de balance hídrico establecida por Llerena (2003):

$$P=Q+ET$$

Donde:

P =Precipitación (m³)

Q =Escurrimiento (m³)

ET =Evapotranspiración (m³)

$$Q= Es + Essl+Essr+ Est$$

Donde:

Es =Escurrimiento superficial (m³)

Essl=Escurrimiento subsuperficial lento (m³)

Essr=Escurrimiento subsuperficial rápido (m³)

Est =Escurrimiento subterráneo (m³)

De acuerdo con FIRCO (2002), el escurrimiento superficial (*Ess*) se divide en escurrimiento subsuperficial rápido y lento, el rápido generalmente forma los manantiales y el lento se une al escurrimiento superficial (*Est*) y conforman el volumen de infiltración (*In*) que no es evapotranspirado y se le denomina volumen de recarga neta potencial.

Sustituyendo la ecuación 1, se obtiene la siguiente (Castro *et al.*, 2016):

$$P = Es+ In + ET$$

Estimación de la precipitación:

Para el caso de estudio, el volumen anual precipitado se calculó con base en datos de precipitación. Los valores de precipitación (m) fueron interpolados a través del algebra de mapas en el software ArcMap 10.2.2 y se multiplicó por el área de estudio, esto se realizó de acuerdo a las ecuaciones establecidas por Aparicio (2009).

$$VP = P*AC$$

Donde:

VP =Volumen anual de precipitación (m³)

P = Precipitación media anual (m)

AC = Área de la cuenca (m²)

Estimación del escurrimiento superficial:

La estimación del escurrimiento superficial se realizó a través de la siguiente ecuación mediante el método del escurrimiento medio (SARH-CP, 1982).

$$Es = AC*C* P$$

Donde:

Es = Volumen promedio que puede escurrir (m³)

AC = Área de la cuenca (m²)

C = Coeficiente de escurrimiento, con valores adimensionales entre 0,1 - 1,0
P = Precipitación media anual en la cuenca (m)

Para identificar el coeficiente de escurrimiento, se utilizó las siguientes ecuaciones que se presenta en el Apéndice Normativo A (A.1.2.1.2) de la NOM-011-CNA-2000 (SEMARNAT, 2002).

$$C = K * \frac{P - 250}{2000} + \frac{K - 0,15}{1,50} \text{ cuando } K > 0,15$$

$$C = K * \frac{P - 250}{2000} \text{ cuando } K \leq 0,15$$

Donde:

k =Parámetro que depende del tipo y uso del suelo (Tabla 11)

P = Precipitación anual o mensual (mm)

Para el caso de estudio el factor k se calculó a través de los mapas de los ecosistemas presentes en el área de estudio que fueron desarrollados a través del método híbrido (clasificación supervisada e interdependiente) de imágenes satelitales para los años 2000 y 2018 a los cuales se les asignaron los valores de k de acuerdo con las zonas de peculiaridades uniformes (Tabla 11 y 12).

El factor k refleja la capacidad del suelo para resistir al desprendimiento de partículas por efecto de la lluvia, es decir, mide la energía necesaria para que conforme a las condiciones físicas del suelo y su tipo de cobertura ocurra desprendimiento de partículas de suelo (Castro *et al.*, 2016).

Tabla 11. Valores de capacidad del suelo para resistir al desprendimiento de partículas por efecto de la lluvia (factor k) que son utilizados en México

Uso del suelo o cubierta vegetal	Tipo de suelo		
	A	B	C
Cultivos			
En hilera	0,24	0,27	0,3
Legumbres o rotación de pradera	0,24	0,27	0,3
Granos pequeños	0,24	0,27	0,3
Pastizal (% de suelo descubierto/pastoreo)			
Más del 75% poco	0,14	0,2	0,28
Del 50% al 75% regular	0,2	0,24	0,3
Menos del 50% mucho	0,24	0,28	0,3
Bosque			
Cubierta más del 75%	0,07	0,16	0,24
Cubierto del 50 al 75%	0,12	0,22	0,26

Continuación de la tabla 11. Valores de capacidad del suelo para resistir al desprendimiento de partículas por efecto de la lluvia (factor *k*) que son utilizados en México

Uso del suelo o cubierta vegetal	Tipo de suelo		
	A	B	C
Cubierto del 25% al 50%	0,17	0,26	0,28
Cubierto menos del 25%	0,22	0,28	0,3
Otros usos			
Pradera permanente	0,18	0,24	0,3
Barbecho, áreas sin cultivo o desnudas	0,26	0,26	0,30
Cascos y zonas con edificaciones	0,26	0,29	0,32
Caminos (incluyendo derecho de vía)	0,27	0,3	0,33

Fuente: SARH-CP (1982).

Tabla 12. Características de los tipos de suelos de acuerdo a su capacidad de resistencia

Tipo de suelo	Características
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos.
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los suelos A; terrenos migajosos.
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.

Fuente: SARH-CP (1982).

Estimación del volumen de recarga neta potencial:

El cálculo del volumen de la recarga neta potencial, se realizó a través de la ecuación establecida por Castro *et al.*, (2016):

$$In = It - ET$$

Donde:

In = Volumen infiltrado (m³)

It = Volumen total infiltrado (m³)

ET = Volumen evapotranspirado (m³)

En cuatro municipios al poniente del Estado de México, el volumen total infiltrado se identificó en relación al coeficiente de escurrimiento y en la precipitación media anual, de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$It = (1 - C) * P * AC$$

Donde:

It = Volumen total infiltrado (m³)

P = Precipitación media anual (m)

AC = Área de la cuenca (m²)

C = Coeficiente de escurrimiento

Estimación del volumen de evapotranspiración:

Al poniente del Estado de México el volumen anual de evapotranspiración se estimó con base a la siguiente ecuación.

$$ET = AC * ETR$$

Donde:

ET = Volumen evapotranspirado (m³)

AC = Área de la cuenca (m²)

ETR = Evapotranspiración anual real (m)

Para el caso de estudio el cálculo de la evapotranspiración anual se realizó a través del método de Turc en relación a los datos de precipitación y temperatura media anual.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,90 + (P/L)^2}}$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración anual real (m)

P = Precipitación media anual (m)

L = Parámetro que está en función de la temperatura media conforme con la ecuación

$$L = 300 + 25 * T + 0,05 * T^3$$

Donde:

P = Precipitación media anual (mm)

T = Temperatura media anual (°C)

Para el caso de estudio se utilizó la escala de intervalos con valores continuos estableciendo rangos para ubicar en donde se encuentran los datos calculados (Tabla 13).

Tabla 13. Escala de intervalos

Zonas de recarga	Recarga neta potencial (Mm ³)
Baja	0-2
Media	2.1-5
Alta	5.1-7

Fuente: Elaboración propia (2020).

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

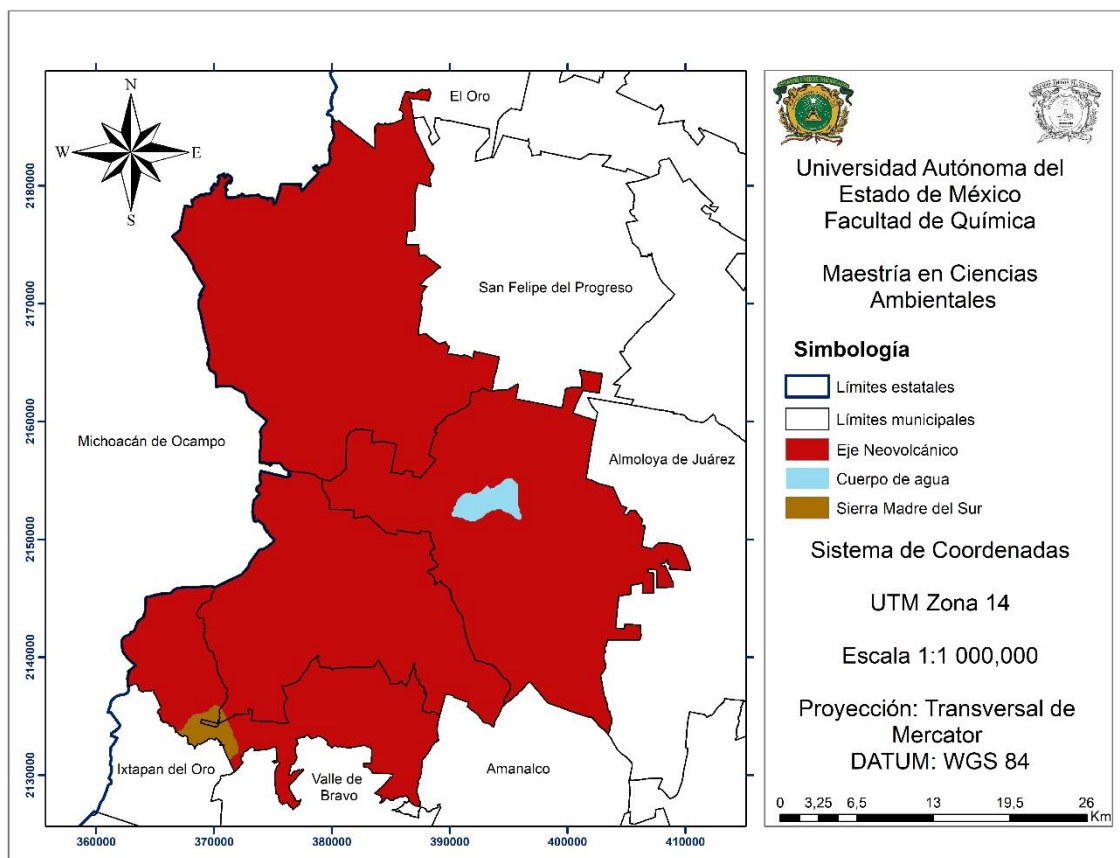
3.1 Caracterización geográfica y ambiental en cuatro municipios al poniente del Estado de México

3.1.1 Elementos y componentes abióticos

La fisiografía al poniente del Estado de México está determinado por dos tipos: el primero en su mayoría del territorio de la zona de estudio pertenece al Eje Neovolcánico Transversal y en una menor porción de espacio localizado en la zona sur del área de estudio corresponde a la Sierra Madre del Sur (Mapa 2).

De acuerdo con el Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos (Donato Guerra 2009a; San José del Rincón 2009b; Villa de Allende 2009c y; Villa Victoria 2009d), la zona del poniente del estado de México su provincia está conformado por el Eje Neovolcánico (94.65%) y la Sierra Madre del Sur (5.35%).

Mapa 2. Fisiografía al poniente del Estado de México



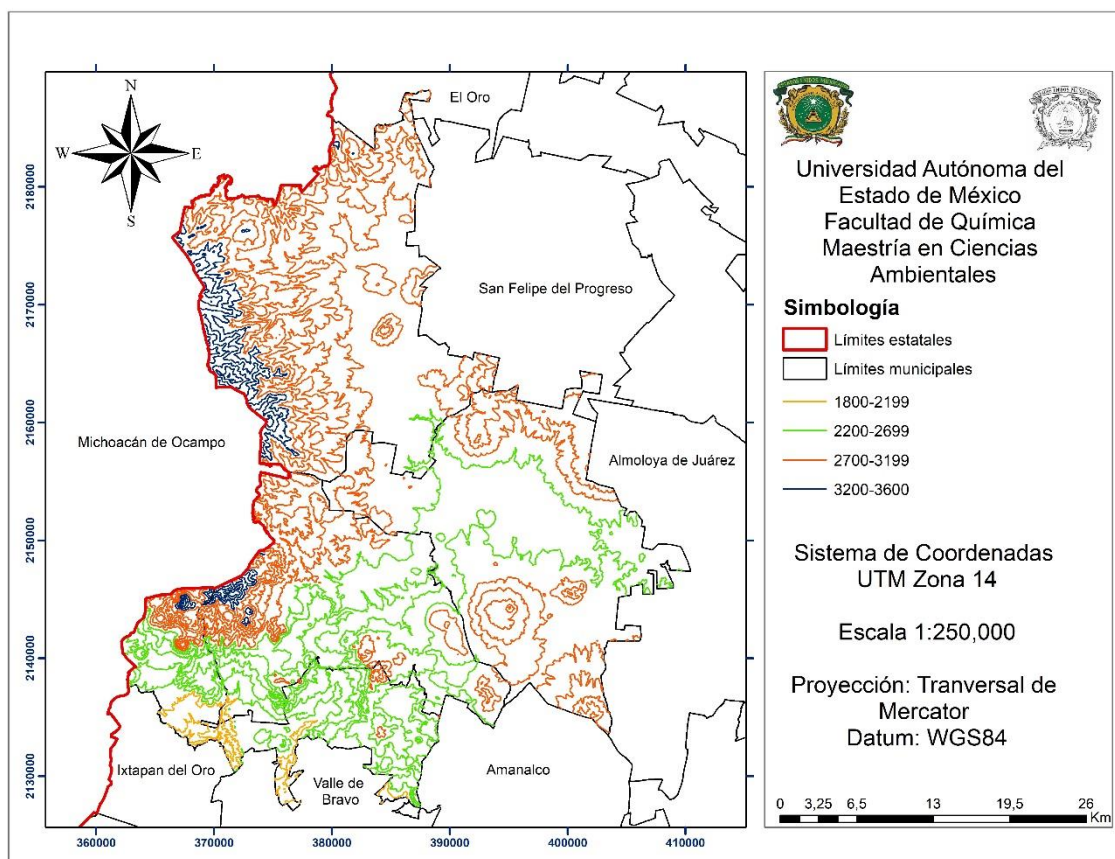
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2001).

De acuerdo con el Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos (Donato Guerra 2009a; San José del Rincón 2009b; Villa de Allende 2009c y; Villa Victoria 2009d), la zona al poniente del Estado de México está conformada por un sistema de topoformas como son: Sierra compleja, Lomerío de basalto con mesetas, Lomerío de basalto, Valle de laderas tendidas, Sierra alta compleja con cañadas, Sierra volcánica de laderas escarpadas, Escudo volcanes y Sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados.

La presencia de diferentes tipos de topoformas a distintas altitudes al poniente del Estado de México corresponde a que la fisiografía pertenece al Eje Neovolcánico Transversal y a la Sierra Madre del Sur. Los sistemas de topoformas que caracterizan al poniente del Estado de México presentan distintas altitudes con el nivel medio del mar, las elevaciones más bajas se localizan en la zona sur que van de los 1800 a los 2199 m.s.n.m.

Las elevaciones que van de los 2200 a los 2699 m.s.n.m. se localizan en la zona centro y sur. Las elevaciones de 2700 a 3199 m.s.n.m. se ubican en la zona norte, este, centro oeste y sureste y las elevaciones más altas se localizan en la zona noroeste y suroeste (Mapa 3).

Mapa 3. Elevaciones al poniente del Estado de México



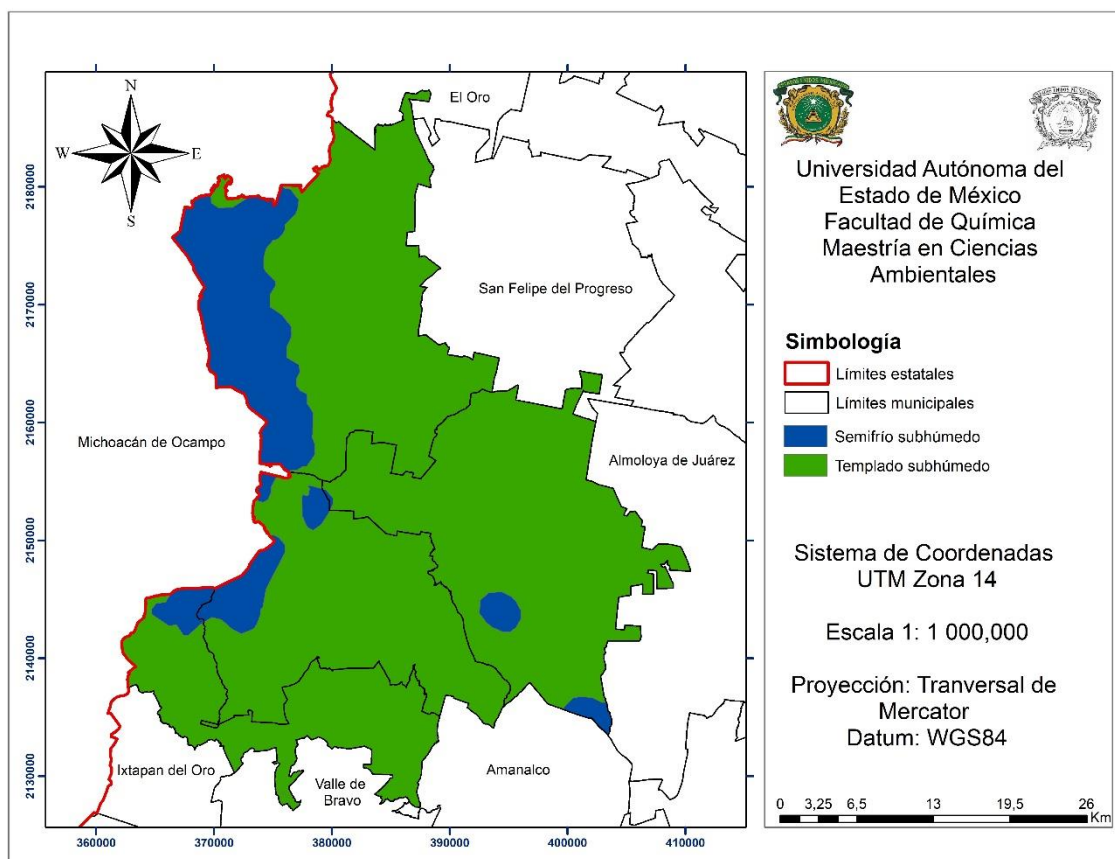
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2018).

De acuerdo con el Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos (Donato Guerra 2009a; San José del Rincón 2009b; Villa de Allende 2009c y; Villa Victoria 2009d), la zona poniente del Estado de México presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad y semifrío subhúmedo con lluvias en verano y de mayor humedad.

El clima del área de estudio está determinado por dos tipos: el primero en la zona noroeste, centro oeste y sureste se presenta un clima semifrío subhúmedo y el segundo en la zona noreste, centro este y sur se presenta un clima templado subhúmedo (Mapa 4).

La presencia de estos dos climas al poniente del Estado de México está relacionado con la fisiografía y el sistema de topoformas que se presentan en el área de estudio, además de las diferentes altitudes que van de los 1800 a los 3600 m.s.n.m. porque a mayores altitudes sobre el nivel medio del mar el clima es más frío y a menores altitudes el clima es más cálido.

Mapa 4. Climas al poniente del Estado de México

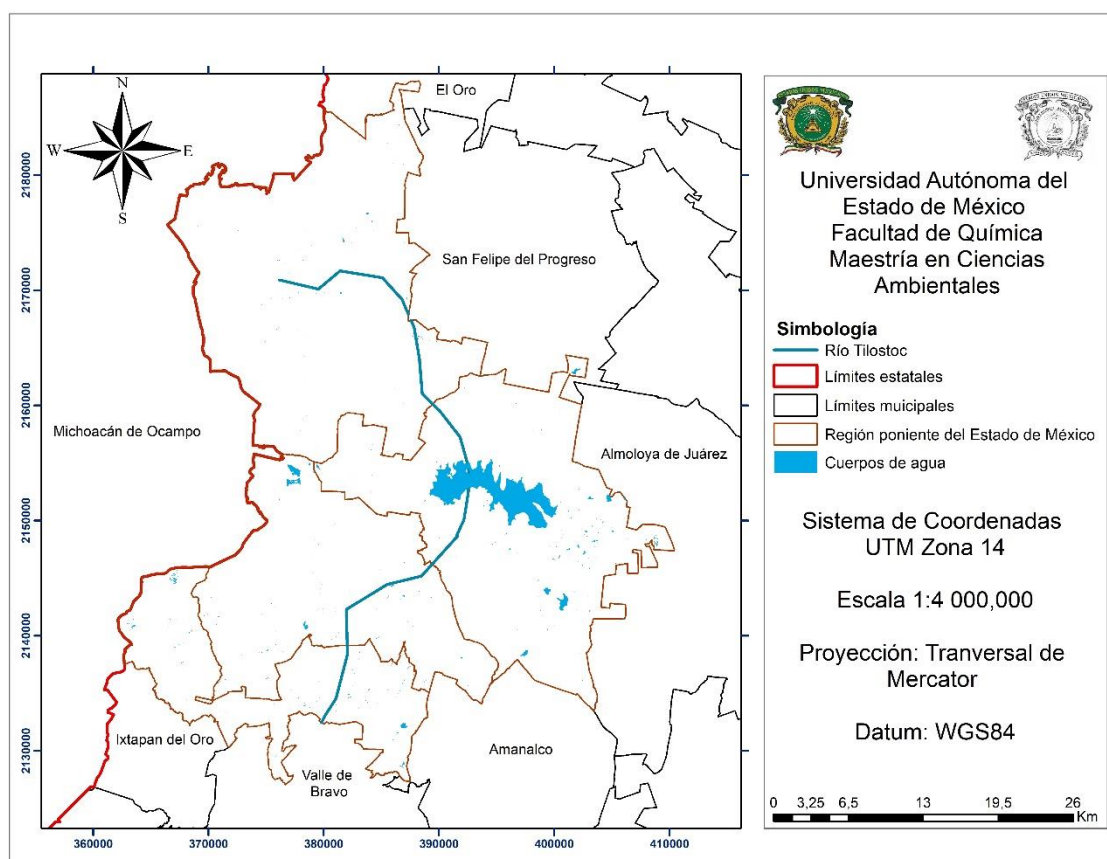


Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2008).

Al poniente del Estado de México la hidrografía principal esta conformada por el Río Tilostoc, que recorre por la zona centro del municipio de Donato Guerra, posteriormente por la zona este de Villa de Allende, consecuentemente por la zona centro oeste de Almoloya de Juárez y por último por la zona sur este y centro de San José del Rincón. Además se localiza la presa de Villa Victoria y bordos dispersos en toda la zona de estudio (Mapa 5).

La zona poniente del Estado de México se encuentra ubicada dentro de la Región Hidrológica del Balsas siendo de suma importancia porque ejerce como fuente principal de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México a través del Sistema Cutzamala. La zona poniente del Estado de México mediante el municipio de San José del Rincón se ubica dentro de la cuenca del Río Lerma que es un importante abastecedor de agua potable para este municipio y los otros 32 que la conforman.

Mapa 5. Hidrografía al poniente del Estado de México

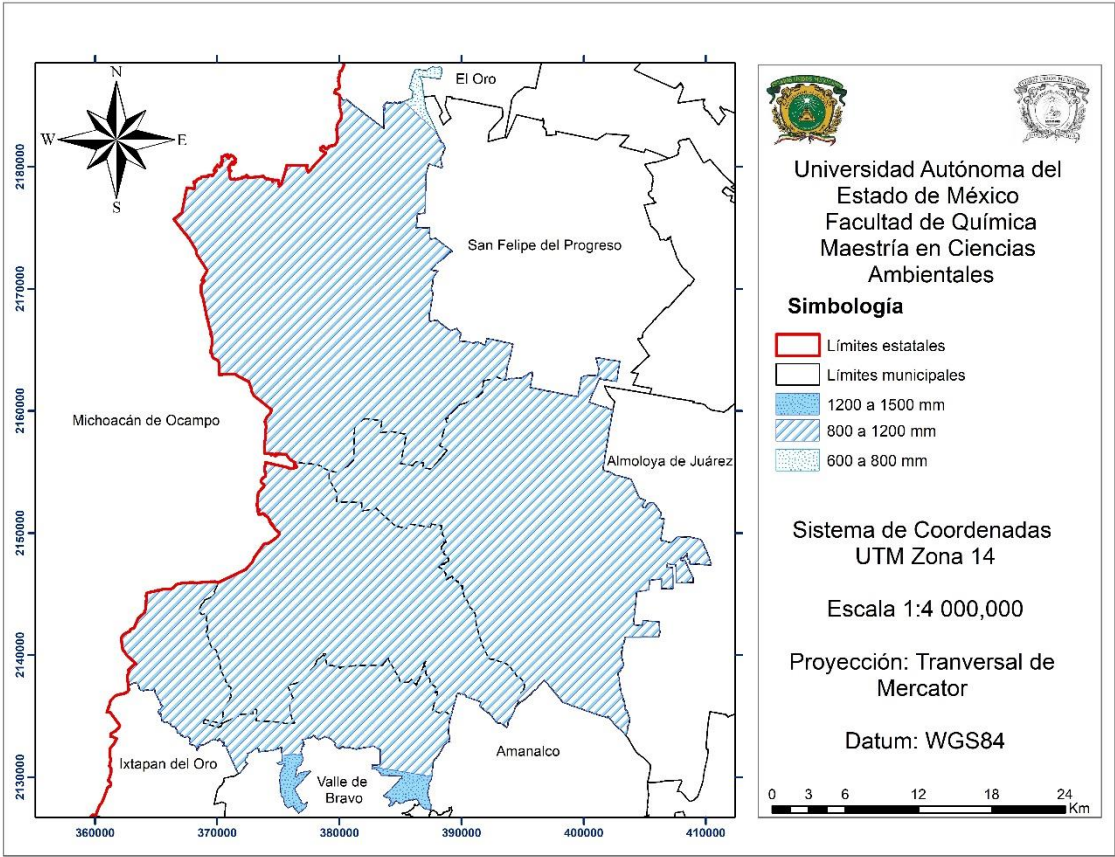


Fuente: Elaboración propia con base en CONABIO (2008).

El mapa 6 presenta la precipitación del área de estudio. En la zona norte del municipio de San José del Rincón se muestra una precipitación media anual de 600 a 800 milímetros de lluvia. La mayor parte del área de estudio tiene una precipitación media anual de 800 mm a 1200 mm y la zona sur del municipio de Donato Guerra muestra una precipitación media anual de 1200 a 1500 mm.

La precipitación media anual del área de estudio esta correlacionada con el clima semifrío subhúmedo y templado subhúmedo y con la altitud sobre el nivel medio del mar. La precipitación permite la infiltración del agua a los acuíferos y así abastecer de agua potable a la población a través de cuencas, ríos y manantiales.

Mapa 6. Precipitación media anual al poniente del Estado de México



Fuente: Elaboración propia con base en CONABIO (2008).

La edafología está contextualizada por siete tipos de suelos de los cuales existen diferentes propiedades y características. La tabla 14 muestra las características generales de los diferentes tipos de suelos que se encuentran localizados en el área de estudio.

Tabla 14. Características de los tipos de suelos al poniente del Estado de México

Tipo	Características
Acrisoles	Los Acrisoles son suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial. Los Acrisoles tienen en determinadas profundidades una baja saturación con bases y arcillas de baja actividad. Los Acrisoles se encuentran en regiones tropicales húmedas, subtropicales húmedas y templado cálidas.
Andosoles	Los Andosoles acomodan a los suelos que se desarrollan en eyecciones o vidrios volcánicos bajo casi cualquier clima. Los Andosoles también pueden desarrollarse en otros materiales ricos en silicatos bajo meteorización ácida en climas húmedos y perhúmedos. Los Andosoles ocurren en regiones volcánicas en todo el mundo y tienen un alto potencial para la producción agrícola.

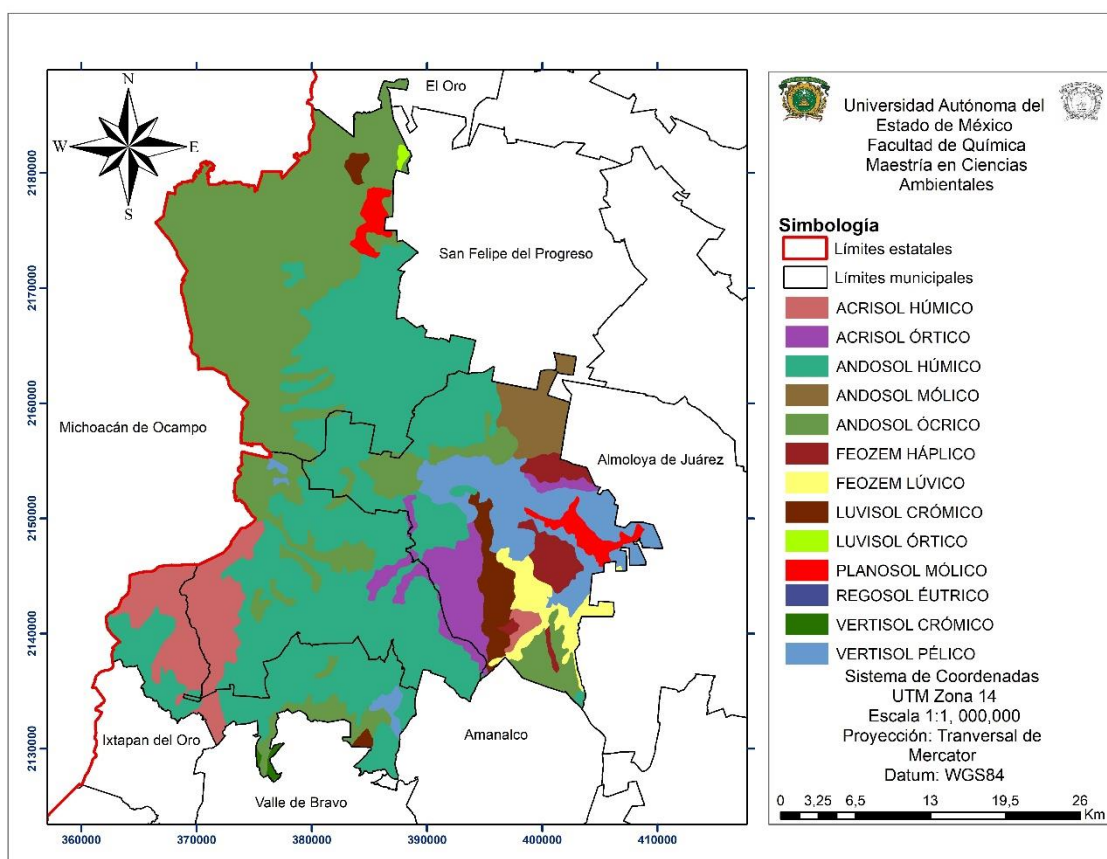
Continuación de la tabla 14. Características de los tipos de suelos al poniente del Estado de México

Tipo	Características
Feozems	Los Feozems acomodan suelos de pastizales relativamente húmedos y regiones forestales en clima moderadamente continental. Los Feozems pueden o no tener carbonatos secundarios pero tienen alta saturación con bases en el metro superior del suelo. Los Feozems son suelos porosos, fértiles y son excelentes tierras agrícolas.
Planosoles	Los Planosoles son suelos con un horizonte superficial de color claro que muestra signos de estancamiento de agua periódico y suprayace abruptamente un subsuelo denso, lentamente permeable con significativo incremento de arcilla respecto del horizonte superficial. El área más grande de Planosoles en el mundo ocurre en regiones subtropicales y templadas. El uso de la tierra en Planosoles normalmente es menos intensivo que el de la mayoría de otros suelos bajo las mismas condiciones climáticas.
Luvisoles	Los Luvisoles son suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos. Los Luvisoles tienen arcillas de alta actividad en todo el horizonte árgico y alta saturación con bases a ciertas profundidades. Los luvisoles se extienden principalmente en regiones templadas y son suelos fértiles y apropiados para usos agrícolas.
Regosoles	Los Regosoles son suelos minerales muy débilmente desarrollados en materiales no consolidados que no tienen un horizonte mólico o úmblico, no son muy someros ni muy ricos en gravas. Los Regosoles están extendidos en tierras erosionadas, particularmente en áreas áridas y semiáridas y en terrenos montañosos y muchos de Los Regosoles se usan para pastoreo extensivo.
Vertisoles	Los Vertisoles suelos muy arcillosos, que se mezclan, con alta proporción de arcillas expandibles. La mayoría de los Vertisoles ocurren en los trópicos semiáridos, con una lluvia media anual de 500–1 000 mm, pero también se encuentran Vertisoles en los trópicos húmedos donde la lluvia alcanza 3000 mm. Estos suelos tienen considerable potencial agrícola, pero el manejo adecuado es una precondition para la producción sostenida.

Fuente: Elaboración propia con base en IUSS (2007).

En el mapa 7 se presentan los suelos que se localizan en el área de estudio como son: Andosol húmico (42.45%) y Andosol ócrico (28.33%) que son suelos de formaciones volcánicas, se localizan en zonas montañosas y cuentan con alta fertilidad para el cultivo de distintas plantas. El resto de los suelos que se localizan en el área de estudio concentran el (29.22%).

Mapa 7. Edafología al poniente del Estado de México



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, (2015).

3.1.2 Elementos y componentes socioeconómicos

La investigación de los patrones de distribución de un espacio geográfico es complejo pero a su vez es básico para la planeación de un territorio. Para su análisis requiere de la integración de factores sociales, económicos, políticos, físicos y culturales que de manera directa e indirecta, influyen, condicionan y determinan la dinámica poblacional de un territorio (Juan *et al.*, 2010). En México a finales del siglo XX, el comportamiento de la población y las actividades económicas determinaron el patrón de distribución y concentración demográfica en algunas ciudades y regiones del país (CONAPO, 2001). Bajo estas circunstancias, comenzó a ser notoria la concentración y acumulación de habitantes en algunas entidades que conforman la República Mexicana, como el caso del Estado de México, que actualmente es considerada la entidad más poblada a nivel nacional (INEGI, 2010).

Al poniente del Estado de México, en el año 1980 se registró un total de 84 900 habitantes (de los cuales 43 559 correspondían a los hombres y 41 536 a mujeres), para el año 1990 se registró un total de 108 819 habitantes (de los cuales 54 627 correspondían a los hombres y 54 192 a mujeres), para el año 1995 el total correspondía a 142 213 habitantes (siendo 63 020 hombres y 62 850 mujeres), para el año 2000 existió un total de 142 213 habitantes (correspondiendo 70 557 hombres y 71 656 mujeres), para el año 2005 la población total corresponde a 229 323 (de los cuales 113 391 son hombres y 115 932 mujeres) y para el año 2010 el total era de 266 878 habitantes (siendo 131 630 hombres y 135 240 mujeres) [Tabla 15].

Tabla 15. Número de habitantes al poniente del Estado de México

Año	Total	Hombres	Mujeres
1980	84,900	43,359	41,536
1990	108,819	54,627	54,192
1995	125,870	63,020	62,850
2000	142,213	70,557	71,656
2005	229,323	113,391	115,932
2010	266,878	131,638	135,240

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (1980, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010).

El crecimiento de la población al poniente del Estado de México se ha presentado de manera constante puesto que para el año 1980 el número de habitantes era de 84 900, incrementándose en 1990 a 108 819 pobladores, representando un aumento del 26.51%; para el año 1995 la población aumentó a 125 870 mostrando un crecimiento del 33.98%; en el año 2000 el número de pobladores aumentó a 142 213 presentando un incremento del 0.04%; para el año 2005 la población creció 229 323 habitantes representando un aumento del 0.07%; y en el año 2010 la población aumentó a 489 333 pobladores representando un crecimiento del 0.08% (Tabla 16).

Tabla 16. Porcentaje del incremento de la población en la zona del poniente del Estado de México

Año	Total	Incremento (%)
1980	84,900	26.51
1990	108,819	33.98
1995	125,870	39.31
2000	142,213	0.04
2005	229,323	0.07
2010	266,878	0.08

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (1980, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010).

La distribución de la población al poniente del Estado de México muestra distintas densidades todas con tendencia ascendente. Para el año 1980 se presentó la menor densidad de población representada en 60 habitantes por Km²; en el año de 1990 la densidad aumentó a 77 personas por Km²; para el año 2005 nuevamente se incrementó la densidad a 162 habitantes por Km²; y en el año 2010 se mostró la mayor densidad con 189 habitantes por Km² (Tabla 17).

Tabla 17. Densidad de población al poniente del Estado de México

Año	Total	Superficie (km²)	Densidad de población (hab/km²)
1980	84,900	1413.4	60
1990	108,819	1413.4	77
1995	125,870	1413.4	89
2000	142,213	1413.4	101
2005	229,323	1413.4	162
2010	266,878	1413.4	189

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (1980, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010).

La población económicamente activa e inactiva en cuatro municipios al poniente del Estado de México muestra que para el año 1990 se presentó un total de 26 049 (18.08%) habitantes activos y 39 494 (20.94%) pobladores inactivos. En el año 2000 el número de personas activas aumentó a 35 338 (24.52%) y los habitantes inactivos fueron 50 805 (26.94%). En el año 2010 se muestra un total de 82 685 (57.39%) habitantes activos y 98 308 (52.12%) personas inactivas (Tabla 18).

Tabla 18. Población económicamente activa e inactiva al poniente del Estado de México

Año	Activa	Porcentaje	Inactiva	Porcentaje	Total
1990	26,049	18.08	39,494	20.94	65,543
2000	35,338	24.53	50,805	26.94	86,143
2010	82,685	57.39	98,308	52.12	180,993

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (1990, 2000, 2010).

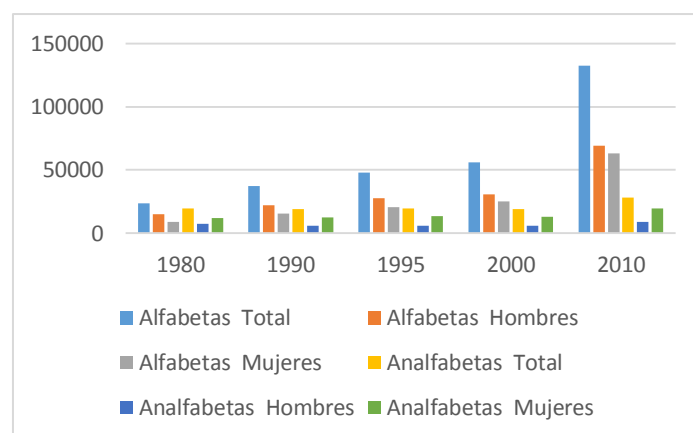
En cuatro municipios al poniente del Estado de México para el año 1980 existía un total de 23 731 habitantes alfabetas y 19 734 analfabetas; para el año 1990 hubo un incremento en el total de población alfabetas con 37 422 y 18 869 analfabetas; en el año 2000 la población total de alfabetas era de 55 947 y 19 018 analfabetas; y para el año 2010 existió el mayor crecimiento de población alfabetas con 132 348 y 28 436 analfabetas (Tabla 19 y Gráfica 1).

Tabla 19. Población alfabeta y analfabeta de 15 años y más al poniente del Estado de México

Año	Alfabeta			Analfabeta		
	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres
1980	23,731	14,798	8933	19,734	7526	12,208
1990	37,422	22,082	15,340	18,869	6181	12,688
1995	48,160	27,584	20,576	19,453	6065	13,388
2000	55,947	30,913	25,034	19,018	5862	13,156
2010	132,348	69,323	63,025	28,436	8816	19,620

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (1980, 1990, 1995, 2000, 2010).

Gráfica 1. Población alfabeta y analfabeta de 15 años y más al poniente del Estado de México



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (1980, 1990, 1995, 2000, 2010).

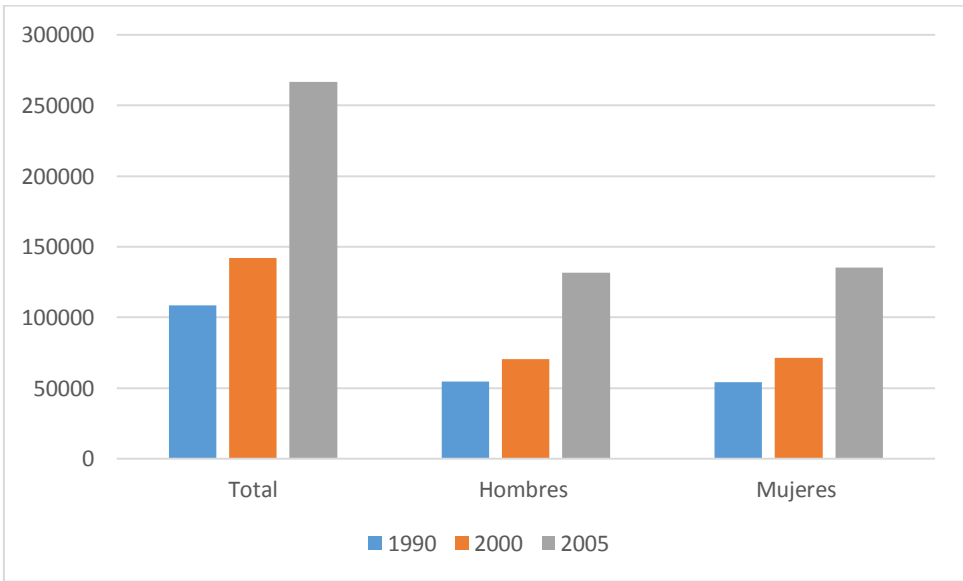
De acuerdo con la tabla 20 y gráfica 2 en el año 1990 la población migrante total era de 108 819 (de los cuales 54 627 corresponden a hombres y 54 192 mujeres); para el año 2000 la población migrante total fue de 142 213 (siendo 70 557 hombres y 71 656 mujeres); y en el año 2005 se presentó el mayor aumento de migración de la población con un total de 266 878 (de los cuales 131 638 eran hombres y 135 240 mujeres).

Tabla 20. Migración de la población al poniente del Estado de México

Migración			
Año	Total	Hombres	Mujeres
1990	108,819	54,627	54,192
2000	142,213	70,557	71,656
2005	266,878	131,638	135,240

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (1990, 2000, 2005).

Gráfica 2. Migración de la población al poniente del Estado de México



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (1990, 2000, 2005).

La población derechohabiente a servicios de salud al poniente del Estado de México, para el año 2000 solo 9072 habitantes contaban con derecho a los servicios de salud que corresponde al 7% mientras que 125 944 pobladores conforman el 93% restante. Para el año 2010, 88 511 (33%) tienen derecho a servicio de salud y 177 448 (67%) personas conforman el resto (Tabla 21).

Tabla 21. Población derechohabiente y no derechohabiente al poniente del Estado de México

Población derechohabiente				
Año	Si	Porcentaje	No	Porcentaje
2000	9072	7	125,944	93
2010	88,511	33	177,448	67

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2000, 2010).

El crecimiento habitacional en cuatro municipios al poniente del Estado de México se ha presentado de manera constante. Para el año 1980 el número de viviendas era de 13 998 incrementándose en 1990 a 18 207 hogares representando un aumento del 10%; para el año 1995 el número de viviendas era de 20 969 presentando un aumento del 12%; para el año 2000 el número de casas habitación se elevó a 26 121 mostrando un crecimiento del 15%; para el año 2005 el número de hogares era de 44 068 representando un incremento del 25%; y para el año 2010 el número de viviendas era de 53 338 constituyendo un incremento del 30% (Tabla 22).

Tabla 22. Total de viviendas al poniente del Estado de México

Año	Total de Viviendas	Porcentaje
1980	13,998	8
1990	18,207	10
1995	20,960	12
2000	26,121	15
2005	44,068	25
2010	53,338	30

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (1980, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010).

3.2 Descripción de los ecosistemas terrestres en cuatro municipios al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018

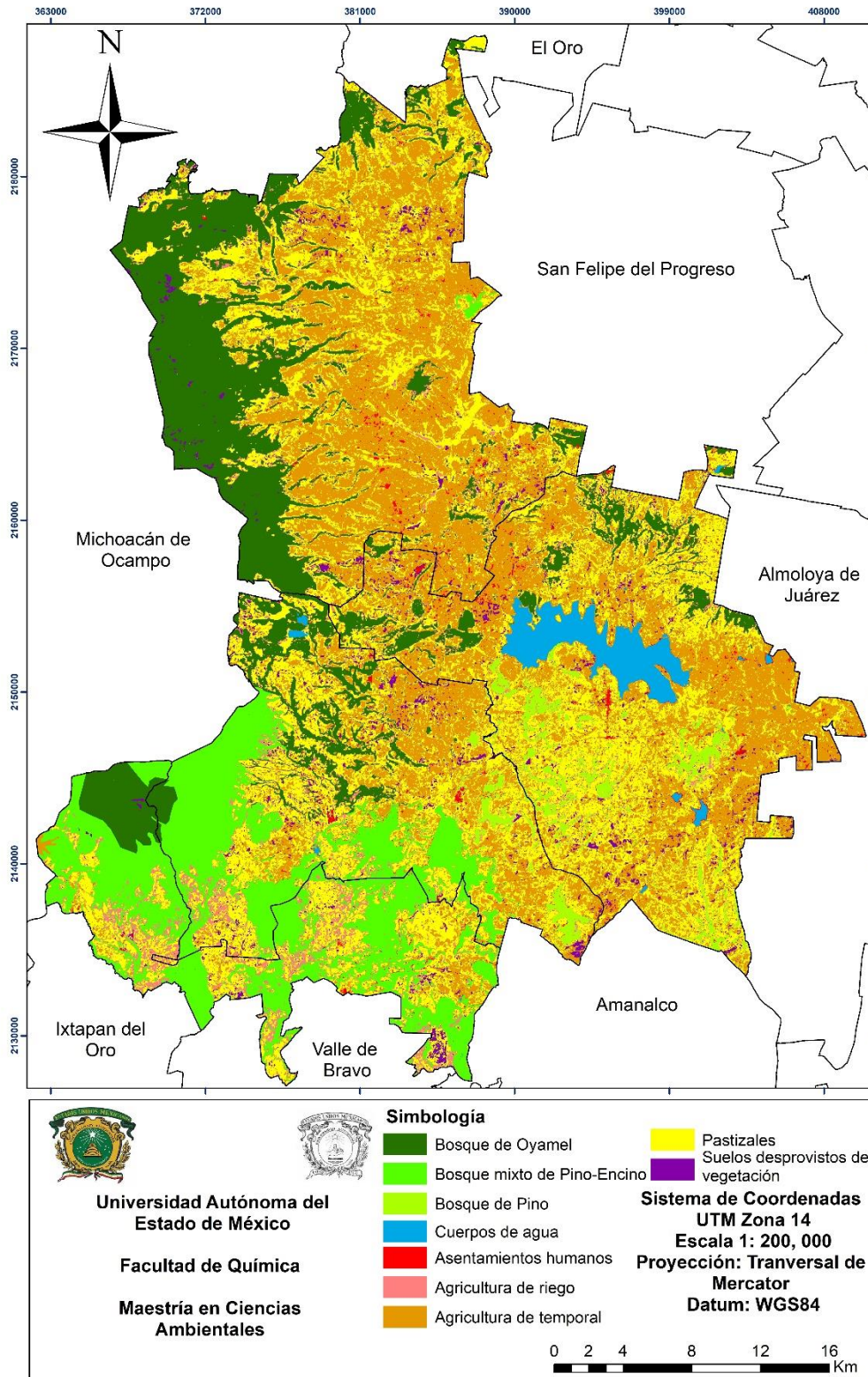
Se elaboraron mapas para los años 2000 y 2018 de los ecosistemas presentes en los cuatro municipios. Para el año 2000, se representaron nueve categorías: agricultura de temporal con un porcentaje de superficie del (29.6%), pastizales (28.1%), bosque de oyamel (15.5%), bosque mixto de pino-encino (12.3%), agricultura de riego (4.8%), suelos desprovistos de vegetación (4.3%), bosque de pino (2.2%), cuerpos de agua (2.1%) y asentamientos humanos (1.1%) [Tabla 23 y Mapa 8].

Tabla 23. Superficie de los ecosistemas presentes en los cuatro municipios para el año 2000

No	Ecosistemas año 2000	Superficie (ha)	%
1	Agricultura de Temporal	41,767	29.6
2	Pastizales	39,756	28.1
3	Bosque de Oyamel	21,880	15.5
4	Bosque mixto de Pino-Encino	17,397	12.3
5	Agricultura de Riego	6,789	4.8
6	Suelos desprovistos de vegetación	6,097	4.3
7	Bosque de Pino	3,135	2.2
8	Cuerpos de Agua	2,924	2.1
9	Asentamientos Humanos	1,595	1.1
	Total	141,340	100

Fuente: Elaboración propia (2019).

Mapa 8. Ecosistemas en los municipios de Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria al poniente del Estado de México para el año 2000



Fuente: Elaboración propia (2019).

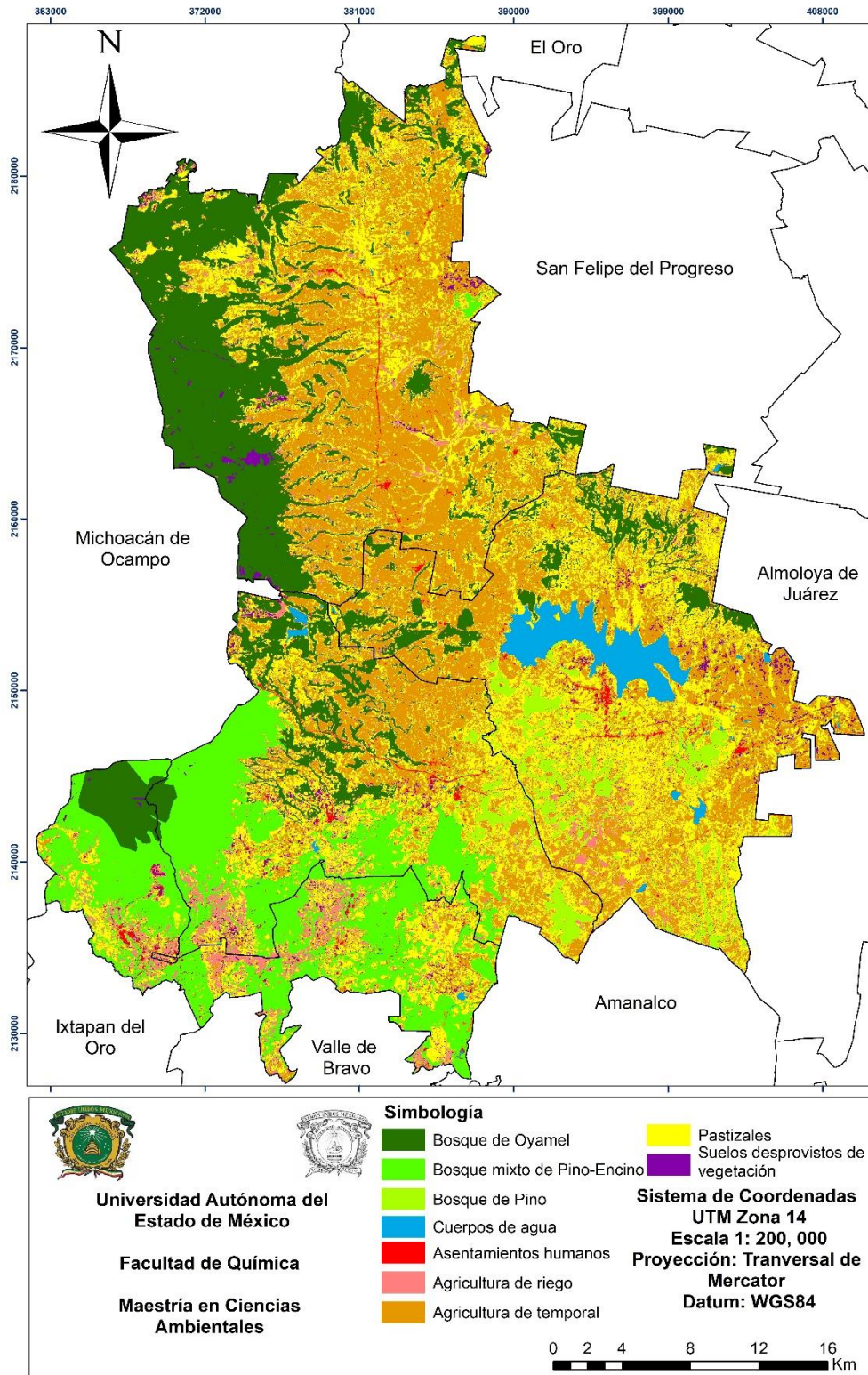
En el mapa del año 2018, la simbología corresponde a nueve categorías: pastizales con un porcentaje de superficie del (26.7%), agricultura de temporal (23.2%), bosque de oyamel (17.5%), bosque mixto de pino-encino (13.1%), suelos desprovistos de vegetación (7.6%), agricultura de riego (4.8%), bosque de pino (3.0%), cuerpos de agua (2.2%) y asentamientos humanos (1.8%) [Tabla 24 y Mapa 9).

Tabla 24. Superficie de los ecosistemas presentes en los cuatro municipios para el año 2018

No	Ecosistemas año 2018	Superficie (ha)	%
1	Pastizales	37,787	26.7
2	Agricultura de Temporal	32,833	23.2
3	Bosque de Oyamel	24,714	17.5
4	Bosque mixto de Pino-Encino	18,544	13.1
5	Suelos desprovistos de vegetación	10,732	7.6
6	Agricultura de Riego	6,828	4.8
7	Bosque de Pino	4,236	3.0
8	Cuerpos de Agua	3,089	2.2
9	Asentamientos Humanos	2,577	1.8
	Total	141,340	100

Fuente: Elaboración propia (2019).

Mapa 9. Ecosistemas en los municipios de Donato Guerra, San José del Rincón. Villa de Allende y Villa Victoria al poniente del Estado de México para el año 2018



Fuente: Elaboración propia (2019).

3.2.1 Post-clasificación (validación) de los ecosistemas terrestres

La confiabilidad de los mapas se determinó para los años 2000 y 2018, en la matriz de confusión o error se muestran los niveles de confiabilidad (Tabla 25). En el mapa del año 2000, de los 900 sitios de muestreo (verdad terreno), 867 corresponden a las categorías representadas en el mapa (verdad imagen) y 33 corresponden a una categoría diferente. El mapa del año 2018, de los 900 sitios de muestreo, 860 corresponden a las categorías representadas en el mapa y 40 corresponden a otra categoría. Estos resultados significan el número de sitios correctamente clasificados de cada categoría en los mapas.

Tabla 25. Análisis de la confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años 2000 y 2018

Año 2000		Categorías del mapa (Verdad imagen)									
		Bosque de Oyamel	Bosque mixto de Pino-Encino	Bosque de Pino	Cuerpos de agua	Asentamientos humanos	Agricultura de riego	Agricultura de temporal	Pastizales	Suelos desprovistos de vegetación	Total de puntos verificados (Verdad terreno)
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Bosque de Oyamel	93	7	0	0	0	0	0	0	0	100
	Bosque mixto de Pino-Encino	5	95	0	0	0	0	0	0	0	100
	Bosque de Pino	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100
	Cuerpos de agua	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100
	Asentamientos humanos	0	0	0	0	93	0	6	0	1	100
	Agricultura de riego	0	0	2	0	0	95	0	3	0	100
	Agricultura de temporal	0	0	0	0	1	0	97	1	1	100
	Pastizales	1	0	1	0	0	0	0	98	0	100
	Suelos desprovistos de vegetación	0	0	0	0	0	0	1	3	96	100
Total categorías del mapa		99	102	103	100	94	95	104	105	98	900
Año 2018		Categorías del mapa (Verdad imagen)									
		Bosque de Oyamel	Bosque mixto de Pino-Encino	Bosque de Pino	Cuerpos de agua	Asentamientos humanos	Agricultura de riego	Agricultura de temporal	Pastizales	Suelos desprovistos de vegetación	Total de puntos verificados (Verdad terreno)
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Bosque de Oyamel	97	3	0	0	0	0	0	0	0	100
	Bosque mixto de Pino-Encino	0	98	2	0	0	0	0	0	0	100
	Bosque de Pino	0	5	95	0	0	0	0	0	0	100
	Cuerpos de agua	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100
	Asentamientos humanos	1	0	0	0	92	4	1	0	2	100
	Agricultura de riego	0	0	0	0	0	92	3	4	1	100
	Agricultura de temporal	0	0	0	0	3	0	94	2	1	100
	Pastizales	0	1	1	0	0	1	0	97	0	100
	Suelos desprovistos de vegetación	1	0	0	0	1	0	1	2	95	100
Total categorías del mapa		99	107	98	100	96	97	99	105	99	900

Fuente: Elaboración propia (2020).

La tabla 26, representa los valores en porcentaje de cada categoría respecto del número total de sitios de muestreo (verdad terreno). De esta forma se logra calcular la superficie en porcentaje de las categorías los mapas (verdad imagen).

En el mapa del año 2000 se obtuvieron las siguientes proporciones: (15.5%) bosque de oyamel; (12.3%) bosque mixto de pino-encino; (2.2%) bosque de pino; (2.1%) cuerpos de agua; (1.1%) asentamientos humanos; (4.8%) agricultura de riego; (29.6%) agricultura de temporal; (28.1%) pastizales; (4.3%) suelos desprovistos de vegetación.

Para el año 2018 las proporciones se comportaron así: (17.5%) bosque de oyamel; (13.1%) bosque mixto de pino-encino; (3.0%) bosque de pino; (2.2%) cuerpos de agua; (1.8%) asentamientos humanos; (4.8%) agricultura de riego; (23.2%) agricultura de temporal; (26.7%) pastizales; y (7.6% de la superficie total) suelos desprovistos de vegetación.

Tabla 26. Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años 2000 y 2018 expresada en proporción

Año 2000					Categorías del mapa (Verdad imagen)						
		Bosque de Oyamel	Bosque mixto de Pino-Encino	Bosque de Pino	Cuerpos de agua	Asentamientos humanos	Agricultura de riego	Agricultura de temporal	Pastizales	Suelos desprovistos de vegetación	Total de puntos verificados (Verdad terreno)
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Bosque de Oyamel	0.106	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.111
	Bosque mixto de Pino-Encino	0.001	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.111
	Bosque de Pino	0.000	0.000	0.111	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.111
	Cuerpos de agua	0.000	0.000	0.000	0.111	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.111
	Asentamientos humanos	0.000	0.000	0.000	0.000	0.104	0.000	0.000	0.000	0.006	0.111
	Agricultura de riego	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.110	0.000	0.001	0.000	0.111
	Agricultura de temporal	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.106	0.001	0.002	0.111
	Pastizales	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.109	0.000	0.111
	Suelos desprovistos de vegetación	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.110	0.111
Total categorías del mapa		0.108	0.115	0.113	0.111	0.106	0.110	0.107	0.111	0.119	1.00
Proporción representada en el mapa		0.155	0.123	0.022	0.021	0.011	0.048	0.296	0.281	0.043	1.00
Año 2018					Categorías del mapa (Verdad imagen)						
		Bosque de Oyamel	Bosque mixto de Pino-Encino	Bosque de Pino	Cuerpos de agua	Asentamientos humanos	Agricultura de riego	Agricultura de temporal	Pastizales	Suelos desprovistos de vegetación	Total de puntos verificados (Verdad terreno)
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Bosque de Oyamel	0.107	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.111
	Bosque mixto de Pino-Encino	0.000	0.109	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.111
	Bosque de Pino	0.000	0.001	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.111
	Cuerpos de agua	0.000	0.000	0.000	0.111	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.111
	Asentamientos humanos	0.006	0.000	0.000	0.000	0.105	0.000	0.000	0.000	0.000	0.111
	Agricultura de riego	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.110	0.001	0.001	0.000	0.111
	Agricultura de temporal	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.105	0.002	0.001	0.111
	Pastizales	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	0.108	0.000	0.111
	Suelos desprovistos de vegetación	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.109	0.111
Total categorías del mapa		0.114	0.115	0.113	0.111	0.108	0.111	0.106	0.111	0.111	1.00
Proporción representada en el mapa		0.175	0.131	0.030	0.022	0.018	0.048	0.232	0.267	0.076	1.00

Fuente: Elaboración propia (2020).

La tabla 27 representa los valores obtenidos a través del método de Card (1982). Este método pondera el número de sitios de verificación (verdad terreno) en relación a la superficie de cada una de las categorías de los mapas (verdad imagen).

Para el mapa del año 2000, se obtuvieron las siguientes proporciones: (15.8%) bosque de oyamel; (11.9%) bosque mixto de pino-encino; (2.2%) bosque de pino; (2.1%) cuerpos de agua; (1.5%) asentamientos humanos; (5.9%) agricultura de riego; (29.7%) agricultura de temporal; (27.8%) pastizales; y (4.2% de la superficie total) suelos desprovistos de vegetación.

Al mapa del año 2018 corresponden las siguientes proporciones: (16.9%) bosque de oyamel; (12.6%) bosque mixto de pino-encino; (3.0%) bosque de pino; (2.2%) cuerpos de agua; (3.6%) asentamientos humanos; (5.1%) agricultura de riego; (23.7%) agricultura de temporal; (26.1%) pastizales; y (8.4% de la superficie total) suelos desprovistos de vegetación.

Tabla 27. Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años 2000 y 2018 expresada en proporción y corregida de acuerdo con Card (1982)

Año 2000		Categorías del mapa (Verdad imagen)									
		Bosque de Oyamel	Bosque mixto de Pino-Encino	Bosque de Pino	Cuerpos de agua	Asentamientos humanos	Agricultura de riego	Agricultura de temporal	Pastizales	Suelos desprovistos de vegetación	Total de puntos verificados (Verdad terreno)
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Bosque de Oyamel	0.152	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.158
	Bosque mixto de Pino-Encino	0.001	0.118	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.119
	Bosque de Pino	0.000	0.000	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022
	Cuerpos de agua	0.000	0.000	0.000	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021
	Asentamientos humanos	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.000	0.001	0.000	0.003	0.015
	Agricultura de riego	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.048	0.000	0.001	0.000	0.059
	Agricultura de temporal	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.294	0.002	0.001	0.297
	Pastizales	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.276	0.000	0.278
	Suelos desprovistos de vegetación	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.040	0.042
Total categorías del mapa		0.155	0.123	0.031	0.021	0.011	0.048	0.295	0.281	0.044	1.0
Proporción representada en el mapa		0.155	0.123	0.022	0.021	0.011	0.048	0.296	0.281	0.043	1.0
Año 2018		Categorías del mapa (Verdad imagen)									
		Bosque de Oyamel	Bosque mixto de Pino-Encino	Bosque de Pino	Cuerpos de agua	Asentamientos humanos	Agricultura de riego	Agricultura de temporal	Pastizales	Suelos desprovistos de vegetación	Total de puntos verificados (Verdad terreno)
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Bosque de Oyamel	0.164	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.169
	Bosque mixto de Pino-Encino	0.000	0.125	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.126
	Bosque de Pino	0.000	0.001	0.029	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030
	Cuerpos de agua	0.000	0.000	0.000	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022
	Asentamientos humanos	0.009	0.000	0.000	0.000	0.018	0.000	0.000	0.000	0.009	0.036
	Agricultura de riego	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.048	0.001	0.002	0.000	0.051
	Agricultura de temporal	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.231	0.006	0.001	0.237
	Pastizales	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.259	0.000	0.261
	Suelos desprovistos de vegetación	0.001	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.001	0.075	0.084
Total categorías del mapa		0.175	0.131	0.030	0.022	0.025	0.048	0.232	0.268	0.085	1.0
Proporción representada en el mapa		0.175	0.131	0.030	0.022	0.018	0.048	0.232	0.267	0.076	1.0

Fuente: Elaboración propia (2020).

La tabla 28 muestra los valores correspondientes a los intervalos de confianza de la confiabilidad de los mapas interpretados, estos intervalos se determinaron para los usuarios y productores, así fue posible determinar la confiabilidad global.

En cuanto al mapa del año 2000, los resultados muestran lo siguiente:

a) La proporción del (100% verdad imagen) para la confiabilidad del usuario se presenta en las categorías cuerpos de agua y agricultura de riego, con error de comisión del (0%); mientras que los suelos desprovistos de vegetación exhiben la menor confiabilidad del usuario del (92%) y el mayor nivel de error de comisión del (8%).

b) La confiabilidad del productor de las clases bosque de pino y cuerpos de agua presentan una proporción del (100% verdad imagen) con error de omisión del 0%, mientras que los asentamientos humanos exhiben la menor confiabilidad del productor del 92% y el mayor nivel de error de omisión del (8%).

c) La confiabilidad global es del (97.44% verdad imagen) y (2.55%) del intervalo de confianza de la confiabilidad global.

Para el mapa del año 2018 los resultados muestran lo siguiente:

a) Los cuerpos de agua presentan (100% verdad imagen) en confiabilidad del usuario con error de comisión del (0%), mientras que el bosque de oyamel exhibe la menor confiabilidad del usuario del (93%) y el mayor nivel de error de comisión del (7%).

b) La confiabilidad del productor para los cuerpos de agua es del (100% verdad imagen) con error de omisión del (0%), mientras que los asentamientos humanos y la agricultura de riego presentan la menor confiabilidad del productor del (93%) y el mayor número de error de omisión del (7%).

c) La confiabilidad global es del (97% verdad imagen), con intervalo de confianza de (1.42%) de la confiabilidad global.

Tabla 28. Coeficientes de los índices de confiabilidad e intervalos de confianza

		Categorías en porcentaje (%)										
		Bosque de Oyamel	Bosque mixto de Pino-Encino	Bosque de Pino	Cuerpos de agua	Asentamientos humanos	Agricultura de riego	Agricultura de temporal	Pastizales	Suelos desprovistos de vegetación	Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza de la confiabilidad global (%)
Año 2000	Confiabilidad del usuario	98	95	99	100	98	100	99	98	92	97.44	2.55
	Error de comisión	2	5	1	0	2	0	1	2	8		
	Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	2.6	4.3	0.2	0	2.4	0	1.4	2.6	5.8		
	Confiabilidad del productor	96	98	100	100	92	97	98	99	95		
	Error de omisión	4	2	0	0	8	3	2	1	5		
	Intervalo de confianza de la confiabilidad del productor	0.04	0.02	0	0	0.06	0.03	0.02	0.02	0.04		
Año 2018	Confiabilidad del usuario	93	95	97	100,0	97	98	99	96	99	97.00	1.42
	Error de comisión	7	5	3	0	3	2	1	4	1		
	Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	5.2	4.2	3.0	0	3.3	2.5	1.5	3.7	1.8		
	Confiabilidad del productor	96	99	97	100	93	93	97	99	97		
	Error de omisión	4	1	3	0	7	7	3	1	3		
	Intervalo de confianza de la confiabilidad del productor	0.03	0.01	0.03	0	0.03	0.05	0.03	0.02	0.03		

Fuente: Elaboración propia (2020).

Ajuste a las superficies derivadas de los mapas clasificados

La tabla 29 representa los valores correspondientes a la proporción y superficie corregida que presenta cada categoría, en relación con el resultado del ajuste de los errores de clasificación. En los mapas del año 2000 y 2018, el ecosistema de cuerpos de agua no se sometió a corrección, debido a la ausencia de errores de omisión y comisión.

Tabla 29. Superficies obtenidas de la clasificación, superficies corregidas por el método de Card y proporción de la superficie corregida para cada ecosistema

Año 2000													
		Bosque de Oyamel	Bosque mixto de Pino-Encino	Bosque de Pino	Cuerpos de agua	Asentamientos humanos	Agricultura de riego	Agricultura de temporal	Pastizales	Suelos desprovistos de vegetación	Superficie Ha	Proporción corregida	Superficie corregida Ha
Sitios de muestreo (Categorías de referencia)	Bosque de Oyamel	0.955	0.045	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21,880	0.16	22,135
	Bosque mixto de Pino-Encino	0.008	0.992	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	17,397	0.12	16,589
	Bosque de Pino	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3135	0.02	3178
	Cuerpos de agua	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2924	0.02	2924
	Asentamientos humanos	0.000	0.000	0.000	0.000	0.939	0.000	0.003	0.000	0.058	1595	0.01	1922
	Agricultura de riego	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.991	0.000	0.005	0.000	6789	0.06	6929
	Agricultura de temporal	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.000	0.956	0.008	0.020	41,767	0.30	41,975
	Pastizales	0.010	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.981	0.000	39,756	0.28	39,676
	Suelos desprovistos de vegetación	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.004	0.994	6097	0.04	6012
Proporción representada en el mapa		0.155	0.123	0.022	0.021	0.011	0.048	0.296	0.281	0.043	141,340	1.0	141,340
Año 2018													
		Bosque de Oyamel	Bosque mixto de Pino-Encino	Bosque de Pino	Cuerpos de agua	Asentamientos humanos	Agricultura de riego	Agricultura de temporal	Pastizales	Suelos desprovistos de vegetación	Superficie Ha	Proporción corregida	Superficie corregida Ha
Sitios de muestreo (Categorías de referencia)	Bosque de Oyamel	0.960	0.040	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	24,714	0.17	23,714
	Bosque mixto de Pino-Encino	0.000	0.985	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	18,544	0.13	18,045
	Bosque de Pino	0.000	0.007	0.993	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4236	0.03	4310
	Cuerpos de agua	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3089	0.02	3089
	Asentamientos humanos	0.052	0.000	0.000	0.000	0.943	0.003	0.001	0.000	0.001	2577	0.04	2977
	Agricultura de riego	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.986	0.005	0.008	0.002	6828	0.05	7587
	Agricultura de temporal	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027	0.000	0.947	0.020	0.007	32,833	0.24	33,933
	Pastizales	0.009	0.000	0.009	0.000	0.000	0.014	0.000	0.968	0.000	37,787	0.26	36,810
	Suelos desprovistos de vegetación	0.004	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.005	0.985	10,732	0.08	10,875
Proporción representada en el mapa		0.175	0.131	0.030	0.022	0.018	0.048	0.232	0.267	0.076	141,340	1.0	141,340

Fuente: Elaboración propia (2020).

3.2.2 Dinámica de los cambios de cobertura y uso del suelo en los ecosistemas para cuatro municipios al poniente del Estado de México

La dinámica de cambios ocurridos en los ecosistemas para los años 2000 y 2018, está relacionada con el desarrollo de programas mediante el Pago por Servicios Ambientales que de acuerdo con (PROBOSQUE, 2020), están dirigidos a mantener e incrementar la cobertura forestal. En el área de estudio la implementación de estos programas ha generado crecimiento en la superficie con cobertura forestal; de modo que permite identificar cambios entre los diferentes ecosistemas terrestres de un año inicial a uno final.

La tabla 30 muestra los resultados de los indicadores de cambio de cobertura y uso del suelo en los ecosistemas para los años 2000 y 2018, los cuales muestran que 96,271 ha (68.11%) de la superficie al poniente del Estado de México no presentó cambios y se mantuvo estable. En contraste, 45,069 ha (31.89% de la superficie total) mostraron cambios (pérdidas-ganancias), entre los diferentes ecosistemas del área de estudio, de los cuales 39,987 ha (28.29%) corresponde a los intercambios y 5,082 ha (3.60%) al cambio neto.

Finalmente, la agricultura de temporal y los pastizales fueron las coberturas que presentaron mayores pérdidas (13,884 ha y 19,849 ha respectivamente), por el contrario, las categorías que presentaron mayores ganancias fueron los pastizales y suelos desprovistos de vegetación (17,880 ha y 8,295 ha cada uno).

Tabla 30. Dinámica de los cambios de la superficie de cada ecosistema en el área de estudio para los años 2000 y 2018

	Bosque de Oyamel	Bosque mixto de Pino-Encino	Bosque de Pino	Cuerpos de agua	Asentamientos humanos	Agricultura de riego	Agricultura de temporal	Pastizales	Suelos desprovistos de vegetación	Total ha/%
Área (ha) 2000	21,880	17,397	3,135	2,924	1,595	6,789	41,767	39,756	6,097	141,340
%	15.48	12.31	2.22	2.07	1.13	4.80	29.55	28.13	4.31	100.00
Área (ha) 2018	24,714	18,544	4,236	3,089	2,577	6,828	32,833	37,787	10,732	141,340
%	17.49	13.12	3.00	2.19	1.82	4.83	23.23	26.73	7.59	100.00
Persistencia	21,448	16,533	2,847	2,854	1,293	1,069	27,883	19,907	2,437	96,271
%	15.17	11.70	2.01	2.02	0.91	0.76	19.73	14.08	1.72	68.11
Pérdidas	432	864	288	70	302	5,720	13,884	19,849	3,660	45,069
%	0.31	0.61	0.20	0.05	0.21	4.05	9.82	14.04	2.59	31.89
Ganancias	3,266	2,011	1,389	235	1,284	5,759	4,950	17,880	8,295	45,069
%	2.31	1.42	0.98	0.17	0.91	4.07	3.50	12.65	5.87	31.89
Cambio total	3,698	2,875	1,677	305	1,586	11,479	18,834	37,729	11,955	45,069
%	2.62	2.03	1.19	0.22	1.12	8.12	13.33	26.69	8.46	31.89
Cambio neto	2,834	1,147	1,101	165	982	39	8,934	1,969	4,635	5,082
%	2.01	0.81	0.78	0.12	0.69	0.03	6.32	1.39	3.28	3.60
Intercambios	864	1,728	576	140	604	11,440	9,900	35,760	7,320	39,987
%	0.61	1.22	0.41	0.10	0.43	8.09	7.00	25.30	5.18	28.29

Fuente: Elaboración propia (2020).

Los resultados de los indicadores de Braimoh, muestran los índices de ganancia-persistencia, pérdida-persistencia y cambio neto-persistencia para el periodo 2000-2018. En el índice ganancia/persistencia la superficie de los ecosistemas de bosque de oyamel, mixto de pino-encino, pino, cuerpos de agua y asentamientos humanos tiende más a persistir que ganar, para el índice de pérdida/persistencia la superficie de los ecosistemas de agricultura de riego y suelos desprovistos de vegetación tiende más a perder que persistir y el índice de cambio neto/persistencia la superficie de los ecosistemas de agricultura de temporal y pastizales tiende más a perder, que ganar superficie (Tabla 31).

Tabla 31. Indicadores de Braimoh 2000-2018

Categoría	Ganancia/Persistencia	Pérdida/Persistencia	Cambio neto/Persistencia
Bosque de Oyamel	0.152	0.020	0.132
Bosque mixto de Pino-Encino	0.122	0.052	0.069
Bosque de Pino	0.488	0.101	0.387
Cuerpos de agua	0.082	0.025	0.058
Asentamientos humanos	0.993	0.234	0.759
Agricultura de riego	5.387	5.351	0.036
Agricultura de temporal	0.178	0.498	-0.320
Pastizales	0.898	0.997	-0.099
Suelos desprovistos de vegetación	3.404	1.502	1.902

Fuente: Elaboración propia (2020).

3.2.3 Distribución espacial de los ecosistemas terrestres en cuatro municipios al poniente del Estado de México para el año 2018 con validación “*in situ*”

La tabla 32 muestra las coordenadas de trece puntos de localización que se obtuvieron durante el recorrido “*in situ*”, además de la altitud sobre el nivel medio del mar del lugar, los puntos de localización se registraron a través del uso del GPS.

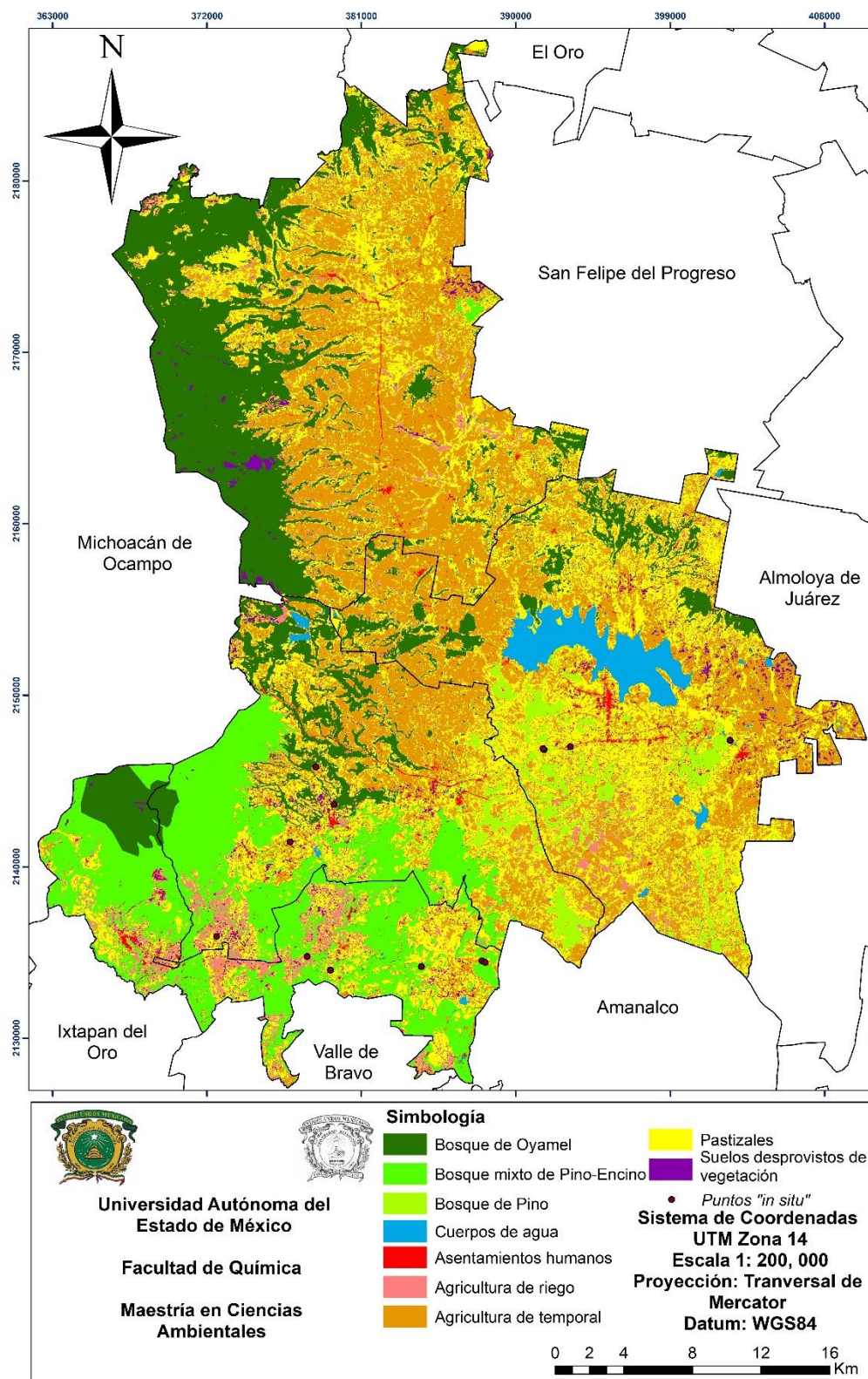
Tabla 32. Validación “*in situ*” al poniente del Estado de México

No. Puntos	Coordenadas		
	X	Y	Z
1	402488	2147362	2590
2	393186	2146994	2661
3	391652	2146822	2633
4	391591	2146884	2617
5	378356	2145824	2544
6	379416	2143634	2403
7	376836	2141439	2447
8	372558	2135934	2185
9	377842	2134759	2162
10	379205	2133966	2293
11	384496	2134166	2614
12	388037	2134506	2502
13	388218	2134425	2513

Fuente: Elaboración propia (2020).

El mapa 10 representa el recorrido realizado “*in situ*” a través del área de estudio el cual se desarrolló de manera estratificada con el objetivo de validar los diferentes ecosistemas que se muestran espacialmente en la cartografía de la descripción de los ecosistemas terrestres para los años 2000 y 2018.

Mapa 10. Distribución espacial de los ecosistemas terrestres en cuatro municipios al poniente del Estado de México (2018) mediante validación de campo “*in situ*”



Fuente: Elaboración propia (2020).

3.2.4 Ecosistemas terrestres originarios en cuatro municipios al poniente del Estado de México

Los cuatro municipios al poniente del Estado de México pertenecen a la región florística Mesoamericana de Montaña, también conocida como Zona de Transición Mexicana, cuyo origen es producto de la asociación o imbricación de los ecosistemas que caracterizan a los reinos Neártico y Neotropical (Halffter, 2003). De acuerdo con Juan (2013), se considera una zona de transición ecológica o de ecotono, donde se establecen con base a las condiciones geográficas y ecológicas que permiten el origen, desarrollo y distribución espacial de diversos ecosistemas terrestres. Una zona de transición ecológica o de ecotono está relacionada con ambientes templados – fríos y tropicales húmedos (Halffter, 2003).

Los ecosistemas terrestres que se presentan al poniente del Estado de México corresponden a los ambientes templados-fríos. Las coberturas originarias que conforman el área de estudio se establecieron de acuerdo al sistema de clasificación de vegetación del INEGI (2017).

Bosque de Oyamel: Se encuentra localizado geográficamente al noroeste, suroeste, centro y este del área de estudio, este ecosistema pertenece a la provincia del Eje Neovolcánico.

De acuerdo con Camacho (2016), los bosques de oyamel se desarrollan en climas semifríos subhúmedos y templados subhúmedos, entre los 2 900 a 3 600 m de altitud, con una temperatura media anual que oscila entre los 8 y 14 °C y una precipitación anual que varía de los 1 000 a 1 500 mm. Esta cobertura vegetal prevalece en rocas ígneas extrusivas básicas y volcanoclásticas como andesitas y basalto y con menor frecuencia en rocas sedimentarias como la arenisca. Se localizan en suelos de tipo Andosol, Acrisol y Cambisol.

Fotografía 1. Bosque de Oyamel al poniente del Estado de México



A) Ecosistema del bosque de oyamel, municipio de Donato Guerra (Camacho, 2020).



B) Especie representativa del bosque de oyamel, municipio de Donato Guerra (Camacho, 2020).

Bosque de Pino-Encino: Se localiza geográficamente al suroeste y noreste del área de estudio, este ecosistema pertenece a la provincia del Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur.

Con base en Camacho (2016), se concentran en climas templados subhúmedos y semifríos subhúmedos, con temperaturas medias anuales que oscilan entre 10 y 22 °C y precipitaciones anuales que van de los 1 500 a los 1 000 mm. Se localizan entre los 1 200 a 3 250 m de altitud. Se establecen en sustrato ígneo extrusivo e intrusivo, y en menor proporción sobre rocas sedimentarias (areniscas) y metamórficas (rocas metasedimentarias y esquisto). Se desarrollan sobre suelos someros, profundos y rocosos como Acrisoles, Andosoles, Luvisoles, Cambisoles, Vertisoles, Feozems, Leptosoles, Luvisoles y Regosoles.

Fotografía 2. Bosque mixto de Pino-Encino al poniente del Estado de México



A) Ecosistema del bosque mixto de pino-encino, municipio de Donato Guerra (Camacho, 2020).



B) Ecosistema del bosque mixto de pino-encino, municipio de Villa de Allende (Camacho, 2020).

Bosque de Pino: Se localiza al sureste y pertenece a la provincia del Eje Neovolcánico Transversal y a la Sierra Madre del Sur.

De acuerdo con Camacho (2016), se localizan en las zonas montañosas y en los sistemas de lomeríos de basalto con mesetas, a una altitud que oscila entre los 1 500 y 3 600 m, se desarrollan en climas templados subhúmedos y semifríos subhúmedos, con temperaturas medias anuales que van de los 8 a 22 °C y precipitaciones anuales que varían de los 1 000 a 1 500 mm.

Fotografía 3. Bosque de Pino al poniente del Estado de México



A) Ecosistema del bosque de pino, municipio de Villa Victoria (Camacho, 2020).



B) Ecosistema del bosque de pino, municipio de Villa Victoria (Camacho, 2020).

Cuerpo de agua: Se localiza en el centro y sur del municipio de Villa Victoria y al noroeste del municipio de Villa de Allende, el principal cuerpo de agua del área de estudio corresponde a la presa de Villa Victoria.

Fotografía 4. Cuerpos de agua al poniente del Estado de México



A) Presa de Villa Victoria, municipio de Villa Victoria (Camacho, 2020).



B) Presa de Villa Victoria, municipio de Villa Victoria (Camacho, 2020).

Asentamientos humanos: El municipio del área de estudio que concentra mayor superficie del ecosistema de asentamientos humanos es Villa Victoria. Superficie artificial construida que posee división entre una vivienda y otra (Camacho, 2017).

Fotografía 5. Asentamientos humanos al poniente del Estado de México



A) Asentamientos humanos, municipio de Villa de Allende (Camacho, 2020).



B) Asentamientos humanos, municipio de Villa Victoria (Camacho, 2020).

Agricultura de riego: Se localiza al sur del municipio de Donato Guerra y al este del municipio de Villa Victoria. Se considera agricultura de riego cuando el

suministro de agua utilizado para su desarrollo es suministrado por fuentes externas, por ejemplo, un pozo, una presa, etcétera (INEGI, 2009).

Fotografía 6. Agricultura de riego al poniente del Estado de México



A) Agricultura de riego, municipio de Villa Victoria (Camacho, 2020).



B) Agricultura de riego, municipio de Donato Guerra (Camacho, 2020).

Agricultura de Temporal: Se localiza al centro, este y oeste del área de estudio, este ecosistema corresponde a la provincia del Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur.

De acuerdo con Camacho (2016), el ciclo vegetativo de los cultivos que se siembran depende del agua de lluvia, por lo que depende de la precipitación y de la capacidad del suelo para retener el agua, su clasificación es independiente del tiempo que dura el cultivo en el suelo, que puede llegar a más de diez años, en el caso de los frutales, o bien son por periodos cortos (un año) como los cultivos de verano, pueden ser áreas de monocultivo o de policultivo y pueden combinarse con pastizales o bien estar mezcladas con zonas de riego, finalmente para ser clasificadas como agricultura de temporal necesitan permanecer sembradas al menos un 80% del ciclo agrícola. Corresponden a suelos aptos para el establecimiento, desarrollo y producción de esta actividad económica (Cambisoles, Vertisoles y Luvisoles, estos últimos con rendimientos moderados).

Fotografía 7. Agricultura de temporal al poniente del Estado de México



A) Agricultura de temporal, municipio de Villa de Allende (Camacho, 2020).



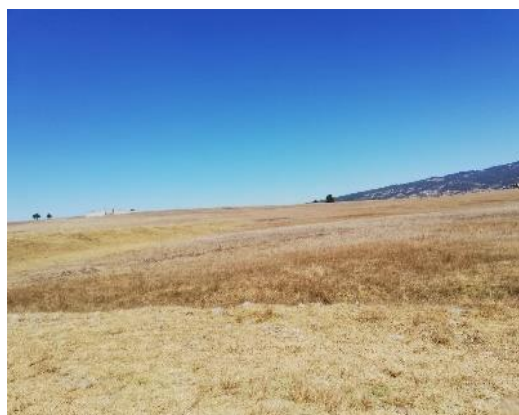
B) Agricultura de temporal, municipio de Villa Victoria (Camacho, 2020).

Pastizal: Se localiza al sureste, suroeste y noroeste del área de estudio. Se desarrollan en suelos medianamente profundos de mesetas, fondos de valles y laderas poco inclinadas, casi siempre de naturaleza ígnea; en diferentes altitudes y bajo diversas condiciones climáticas (en ambientes cálidos y templados – semifríos). Los pastizales en cuestión son generalmente de altura media, de 20 a 70 cm, aunque a causa del intenso pastoreo se mantienen casi siempre a alturas menores a las referidas. Su cobertura varía notoriamente de un lugar a otro producto de la utilización del mismo. Sin embargo, rara vez supera el 80% y frecuentemente es menor de 50% (Camacho, 2016).

Fotografía 8. Pastizales al poniente del Estado de México



A) Ecosistema de pastizal, municipio de Villa de Allende (Camacho, 2020).



B) Ecosistema de pastizal, municipio de Villa Victoria (Camacho, 2020).

Suelos desprovistos de vegetación: Se localiza al noroeste y centro del área de estudio. Con base en INEGI (2009), se consideran únicamente los procesos de erosión favorecidos por actividades humanas y naturales, y que son apreciables en la imagen de satélite a la escala de edición.

Fotografía 9. Suelos desprovistos de vegetación al poniente del Estado de México



A) Suelos desprovistos de vegetación, municipio de Donato Guerra (Camacho, 2020).



B) Suelos desprovistos de vegetación, municipio de Donato Guerra (Camacho, 2020).

3.3 Captura de carbono en cuatro municipios al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018

3.3.1 Captura de carbono al poniente del Estado de México para el año 2000

El ecosistema de bosque de oyamel presenta una superficie de (21,880 ha) lo cual generó una captura de carbono de (1,017,420 ton*ha). El ecosistema forestal de bosque mixto de pino-encino tiene una superficie de (17,397 ha), este ecosistema adquirió una captura de carbono de (834,708 ton*ha). El ecosistema de pino presenta una superficie de (3,135 ha), este ecosistema logró una captura de carbono de (157,722 ton*ha). Para el año 2000 la captura de carbono total fue de (2, 009,850 ton*ha) [Tabla 33].

Tabla 33. Total de captura de carbono por ecosistema forestal al poniente del Estado de México para el año 2000

Cobertura forestal	Superficie (ha)	Total de captura de carbono (ton*ha)
Bosque de Oyamel	21,880	1,017,420
Bosque mixto de Pino-Encino	17,397	834,708
Bosque de Pino	3,135	157,722

Fuente: Elaboración propia (2020).

En el año 2000 el municipio de San José del Rincón obtuvo una superficie de (14,671 ha) lo cual generó un total de captura de carbono de (682,365 ton*ha), de los cuales (677,087 ton*ha) corresponden al ecosistema de bosque de oyamel que presentó una superficie de (14,561 ha) y (5,278 ton*ha) al ecosistema de bosque mixto de pino-encino con superficie de (1,10 ha). El municipio de Villa de Allende adquirió una superficie de (11,811 ha) lo cual generó un total de captura de carbono de (564,041 ton*ha), de los cuales (143,918 ton*ha) pertenecen al ecosistema de bosque de oyamel que logró una superficie de (3,095 ha), (378,466 ton*ha) al ecosistema de bosque mixto de pino-encino con una superficie de (7,888 ha) y (41,657 ton*ha) al ecosistema de bosque de pino con superficie de (829 ha). Por su parte, el municipio de Donato Guerra presentó una superficie de (10,930 ha) del cual generó un total de captura de carbono de (522,155 ton*ha), de los cuales (71,191 ton*ha) concienrnen al ecosistema de bosque de oyamel que obtuvo una superficie de (1,531 ha) y (450,964 ton*ha) al

ecosistema de bosque mixto de pino-encino con superficie de (9,399 ha). Finalmente el municipio de Villa Victoria logró una superficie de (5,000 ha) del cual generó un total de captura de carbono de (241,289 ton*ha), de los cuales (125,224 ton*ha) incumben al ecosistema de bosque de oyamel que logró una superficie de (2,693 ha) y (116,065 ton*ha) al ecosistema de bosque de pino con superficie de (2,307 ha) [Tabla 34].

Tabla 34. Captura de carbono por municipio y ecosistema forestal para el año 2000

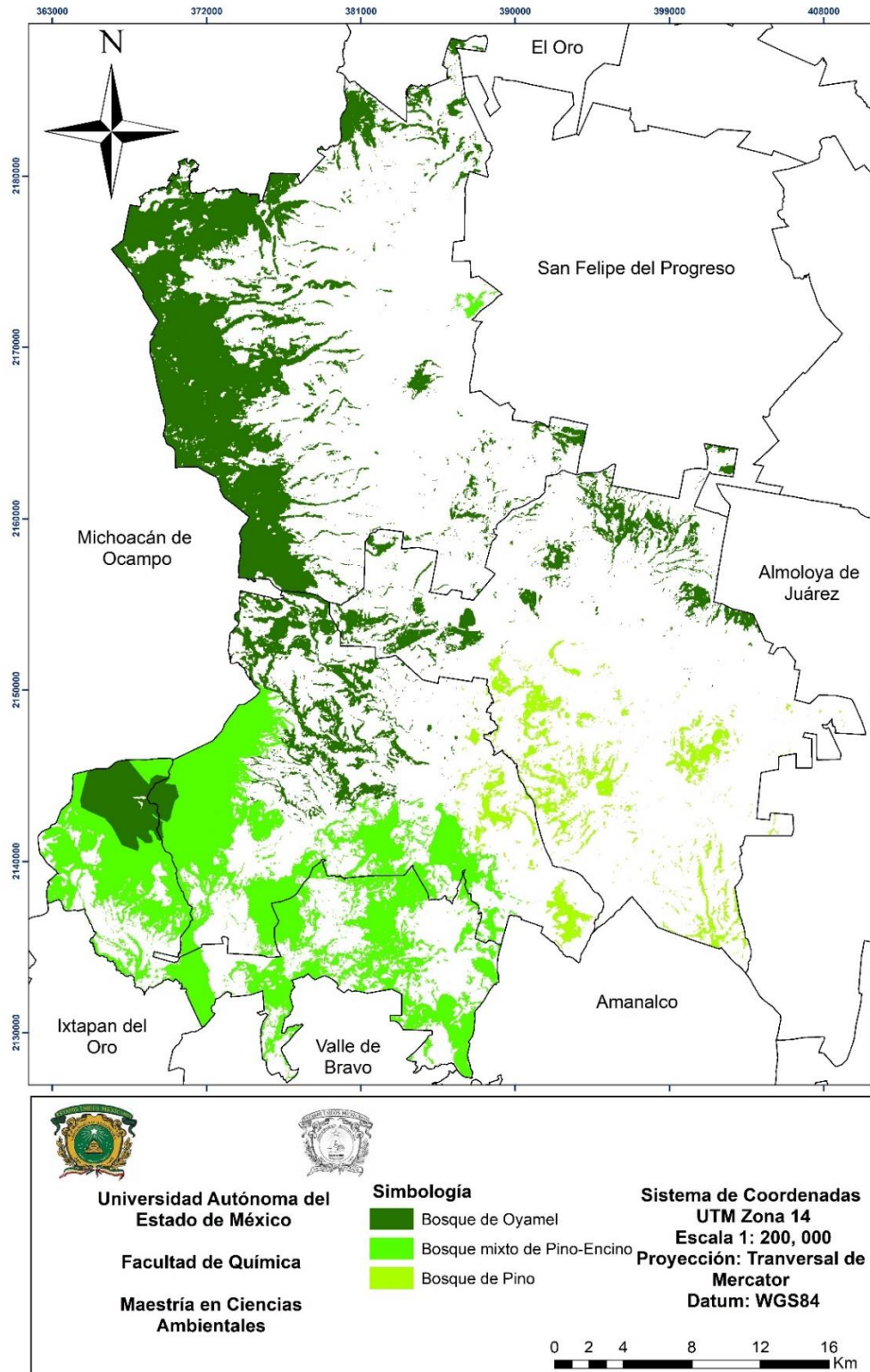
Municipio	Cobertura Forestal	Superficie (ha)	Carbono almacenado (ton*ha)	Total de carbono almacenado por municipio (ton*ha)
San José del Rincón	Bosque de Oyamel	14,561	677,087	682,365
	Bosque mixto de Pino-Encino	110	5,278	
	Bosque de Pino	0	0	
Villa de Allende	Bosque de Oyamel	3,095	143,918	564,041
	Bosque mixto de Pino-Encino	7,888	378,466	
	Bosque de Pino	828	41,657	
Donato Guerra	Bosque de Oyamel	1,531	71,191	522,155
	Bosque mixto de Pino-Encino	9,399	450,964	
	Bosque de Pino	0	0	
Villa Victoria	Bosque de Oyamel	2,693	125,224	241,289
	Bosque mixto de Pino-Encino	0	0	
	Bosque de Pino	2,307	116,065	

Fuente: Elaboración propia (2020).

El mapa 11 muestra la distribución espacial de los ecosistemas forestales presentes para el año 2000, el bosque de oyamel se localiza al noroeste, suroeste, centro y este, posteriormente el bosque mixto de pino-encino se sitúa

al suroeste y noreste, finalmente el bosque de pino se ubica sureste del área de estudio.

Mapa 11. Ecosistemas forestales al poniente del Estado de México (2000)



Fuente: Elaboración propia (2020).

3.3.2 Captura de carbono al poniente del Estado de México para el año 2018

El ecosistema de bosque de oyamel presenta una superficie de (24,714 ha) lo cual generó una captura de carbono de (1,149,201 ton*ha). El ecosistema forestal de bosque mixto de pino-encino tiene una superficie de (18,544 ha), este ecosistema adquirió una captura de carbono de (889,741 ton*ha). El ecosistema de pino presenta una superficie de (4,236 ha), este ecosistema logró una captura de carbono de (213,113 ton*ha). Para el año 2018 la captura de carbono total fue de (2, 252,055 ton*ha) [Tabla 35].

Tabla 35. Total de captura de carbono por ecosistema forestal al poniente del Estado de México para el año 2018

Cobertura forestal	Superficie (ha)	Total de captura de carbono (ton*ha)
Bosque de Oyamel	24,714	1,149,201
Bosque mixto de Pino-Encino	18,544	889,741
Bosque de Pino	4,236	213,113

Fuente: Elaboración propia (2020).

Para el año 2018 el municipio de San José del Rincón obtuvo una superficie de (16,436 ha) lo cual generó un total de captura de carbono de (764,450 ton*ha), de los cuales (758,740 ton*ha) corresponden al ecosistema de bosque de oyamel que adquirió una superficie de (16,317 ha) y (5,710 ton*ha) al ecosistema de bosque mixto de pino-encino con superficie de (119 ha). El municipio de Villa de Allende adquirió una superficie de (13,083 ha) lo cual generó un total de captura de carbono de (624,883 ton*ha), de los cuales (167,307 ton*ha) pertenecen al ecosistema de bosque de oyamel que presentó una superficie de (3,598 ha), (403,895 ton*ha) al ecosistema de bosque mixto de pino-encino que logró una superficie de (8,418 ha) y (53,681 ton*ha) al ecosistema de bosque de pino con superficie de (1,067 ha). Por su parte, el municipio de Donato Guerra presentó una superficie de (11,537 ha) lo cual generó un total de captura de carbono de (551,281 ton*ha), de los cuales (71,145 ton*ha) concienrnen al ecosistema de bosque de oyamel que logró una superficie de (1,530 ha) y (480,136 ton*ha) al ecosistema de bosque mixto de pino-encino con superficie de (10,007 ha). Finalmente el municipio de Villa Victoria logró un superficie de (6,438 ha) del cual generó un total de captura de carbono de (311,441 ton*ha), de los cuales

(152,009 ton*ha) incumben al ecosistema de bosque de oyamel que presentó una superficie de (3,269 ha) y (159,432 ton*ha) al ecosistema de bosque de pino con superficie de (3,169 ha) [Tabla 36].

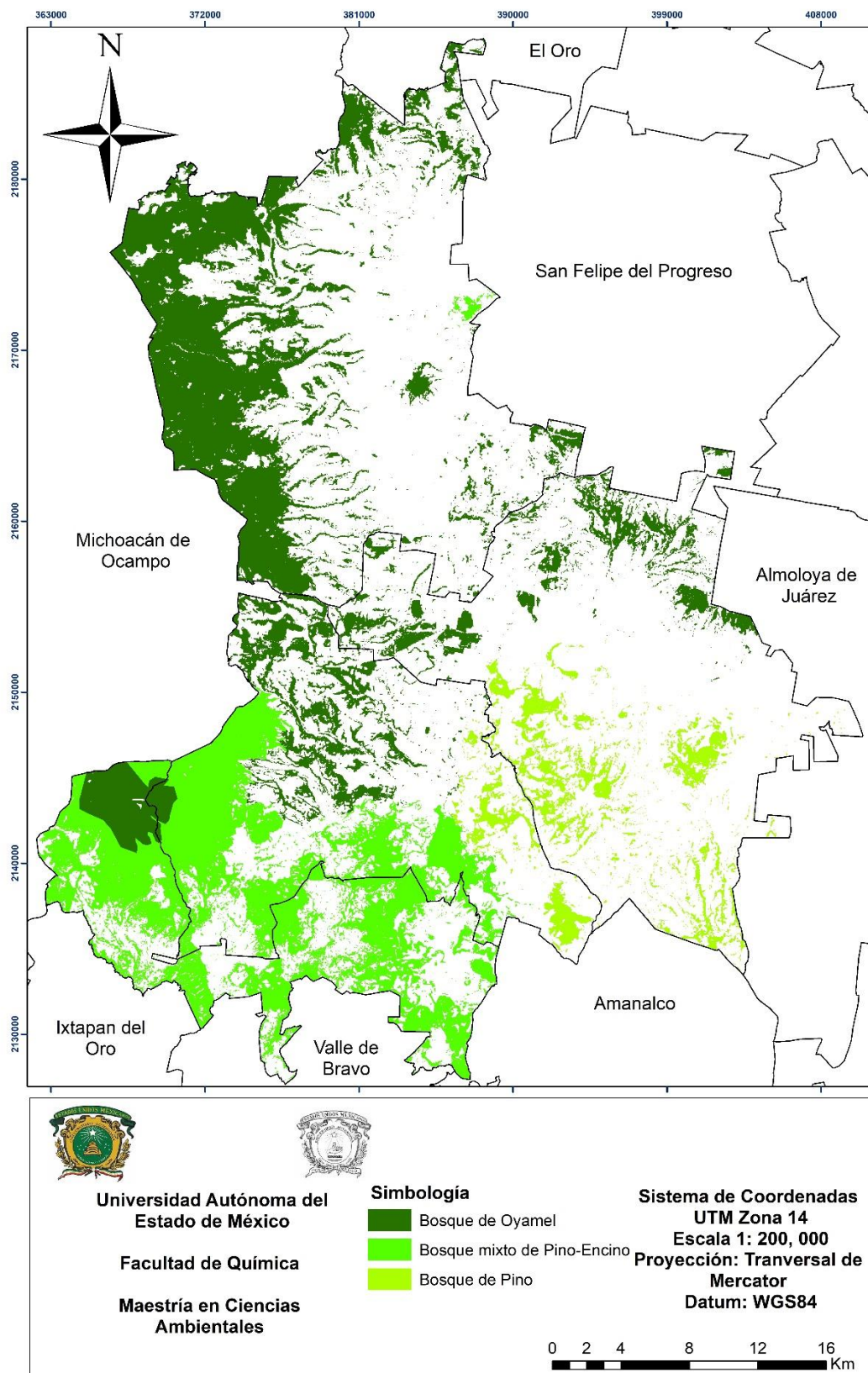
Tabla 36. Captura de carbono por municipio y ecosistema forestal para el año 2018

Municipio	Cobertura Forestal	Superficie (ha)	Carbono almacenado (ton*ha)	Total de carbono almacenado por municipio (ton*ha)
San José del Rincón	Bosque de Oyamel	16,317	758,740	764,450
	Bosque mixto de Pino-Encino	119	5,710	
	Bosque de Pino	0	0	
Villa de Allende	Bosque de Oyamel	3,598	167,307	624,883
	Bosque mixto de Pino-Encino	8,418	403,895	
	Bosque de Pino	1,067	53,681	
Donato Guerra	Bosque de Oyamel	1,530	71,145	551,281
	Bosque mixto de Pino-Encino	10,007	480,136	
	Bosque de Pino	0	0	
Villa Victoria	Bosque de Oyamel	3,269	152,009	311,441
	Bosque mixto de Pino-Encino	0	0	
	Bosque de Pino	3,169	159,432	

Fuente: Elaboración propia (2020).

El mapa 12 muestra la distribución espacial de los ecosistemas forestales presentes para el año 2018, el bosque de oyamel se localiza al noroeste, suroeste, centro y este, posteriormente el bosque mixto de pino-encino se sitúa al suroeste y noreste, finalmente el bosque de pino se ubica al sureste del área de estudio.

Mapa 12. Ecosistemas forestales al poniente del Estado de México (2018)



Fuente: Elaboración propia (2020).

El incremento de cobertura forestal de un año inicial (2000) a un final (2018) permitió mayor captura de carbono por parte de los ecosistemas forestales. Apartir del año 2016 la población de los municipios de San José del Rincón, Villa de Allende, Villa Victoria dueños de predios forestales recibieron una compensación económica de \$1500.00 por hectárea, a través del programa PROCARBONO mediante el pago por servicios ambientales, de acuerdo con PROBOSQUE (2020), está dirigido a mantener e incrementar los almacenes de carbono en sus predios, los principales beneficios ambientales que se pretendían alcanzar eran: mantener la cobertura forestal; evitar el cambio de uso del suelo; mayor recarga de los mantos acuíferos, evitar la erosión de los suelos; y conservar la biodiversidad.

La población originaria además de obtener un apoyo económico por la conservación y protección de los ecosistemas forestales adquiere una mejor calidad de vida generada por los ciclos naturales que desarrollan los ecosistemas forestales mejorando la calidad del aire y capturando mayores toneladas de carbono. La conservación y protección de los ecosistemas forestales mejora las condiciones de los recursos naturales.

La tabla 37 muestra la diferencia de superficie y toneladas de captura de carbono que existió de un año inicial (2000) a un año final (2018) por ecosistema forestal. El ecosistema de bosque de oyamel obtuvo un incremento de (2,834 ha) generando así una mayor captura de carbono de (131,781 ton*ha). Por su parte el ecosistema de bosque mixto de pino-encino presentó un incremento de (1,147 ha) creando así una mayor captura de carbono de (55,033 ton*ha). Finalmente el ecosistema de bosque de pino logró un incremento de (1,101 ha) creando así una mayor captura de carbono de (55,391 ton*ha).

Tabla 37. Cambios en la superficie y captura de carbono por ecosistema forestal al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018

Cobertura forestal	Superficie 2000 (ha)	Total de captura de carbono 2000 (ton*ha)	Superficie 2018 (ha)	Total de captura de carbono 2018 (ton*ha)	Diferencia de superficie 2000-2018 (ha)	Diferencia total de captura de carbono 2000-2018 (ton*ha)
Bosque de Oyamel	21,880	1,017,420	24,714	1,149,201	+2,834	+131,781
Bosque mixto de Pino-Encino	17,397	834,708	18,544	889,741	+1,147	+55,033
Bosque de Pino	3,135	157,722	4,236	213,113	+1,101	+55,391

Fuente: Elaboración propia (2020).

3.3.3 Validación “*in situ*” del diámetro y altura de árboles presentes al poniente del Estado de México

La tabla 38, representa la altura y diámetro de 120 árboles en total muestreados “*in situ*” de los cuales corresponden a 40 del ecosistema de bosque de oyamel, 40 del ecosistema de bosque de pino y 40 del ecosistema de bosque de encino. El registro del diámetro y altura menor del árbol que pertenece al ecosistema de bosque de oyamel es de (42 cm y 11 metros), lo contrario, el diámetro y altura mayor es de (75 cm y 23 metros). Por su parte, el registro del diámetro y altura menor del árbol que concierne al ecosistema de bosque de pino es de (56 cm y 7 metros), lo contrario, el diámetro y altura mayor es de (71 cm y 11 metros). Finalmente el registro del diámetro y altura menor del árbol que pertenece al ecosistema de bosque de encino es de (31 cm y 7 metros), lo contrario, el diámetro y altura mayor es de (45 cm y 15 metros).

Así mismo, la tabla 38 muestra las características ambientales en las que se desarrollan cada uno de los ecosistemas forestales en los cuatro municipios al poniente del Estado de México (Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria) en comparación con los datos ambientales presentados por los autores consultados.

En el estudio de Avendaño *et al.* (2009), el diámetro normal de los árboles muestreados de *Abies religiosa* (Oyamel) varió de 5.7 a 79 cm, con variación de alturas de 6.8 a 45.5 m. Por su parte, en el estudio de Díaz *et al.* (2007), para el bosque de pino las condiciones del diámetro variaron de 6.7 a 64.1 cm. Finalmente en el estudio de Jiménez *et al.* (2013), para el bosque de encino las categorías del diámetro variaron de 5 a 40 cm.

Las características de los árboles muestreados “*in situ*” de los ecosistemas forestales del bosque de oyamel, de pino y encino en los cuatro municipios al poniente del Estado de México presentan relación con las características del diámetro y altura de los arboles muestreados por Díaz *et al.* (2007); Avendaño *et al.* (2009); y Jiménez *et al.* (2013).

Fotografía 10. Medición de altura y diámetro de los árboles forestales al poniente del Estado de México





A) Árbol de Encino, municipio de Villa de Allende (Camacho, 2020).




B) Árbol de Pino, municipio de Villa Victoria (Camacho, 2020).

Tabla 38. Características ambientales y morfológicas de los ecosistemas del bosque de Oyamel, de Pino y mixto de Pino-Encino

Tipo de ecosistema	Características	Cuatro municipios al poniente del Estado de México	Avendaño et al., (2009)
Bosque de Oyamel 	Grosor promedio de los árboles	42-75 cm	5.7-79 cm
	Altura de los árboles	11-23 m	6.8-45.5 m
	Clima	Templado y Semifrío subhúmedo	Templado
	Precipitación	600-1500mm	700-1000mm
	Temperatura	8-22 °C	18-24°C
	Altitud	1800-3600 msnm	2820 msnm
	Pendiente	3-61°	-----
Tipo de ecosistema	Características	Cuatro municipios al poniente del Estado de México	Díaz et al., (2007)
Bosque de Pino 	Grosor promedio de los árboles	56-71 cm	6.7-64.1 cm
	Altura de los árboles	7-11 m	-----
	Clima	Templado y Semifrío subhúmedo	Templado
	Precipitación	600-1500mm	599-1000 mm
	Temperatura	8-22°C	19-24°C
	Altitud	1800-3600 msnm	2875 msnm
	Pendiente	3-61°	-----

Continuación de la tabla 38. Características ambientales y morfológicas de los ecosistemas del bosque de Oyamel, de Pino y mixto de Pino-Encino

Tipo de ecosistema	Características	Cuatro municipios al poniente del Estado de México	Jiménez <i>et al.</i> , (2013)
<p>Boque de Encino</p> 	Grosor promedio de los árboles	31-45 cm	5-40 cm
	Altura de los árboles	7-15 m	-----
	Clima	Templado y Semifrío subhúmedo	Templado Subhúmedo
	Precipitación	600-1500mm	639mm
	Temperatura	8-22°C	13.9°C
	Altitud	1800-3600 msnm	1600 msnm
	Pendiente	3-61°	-----

Fuente: Elaboración propia (2020).

3.4 Recarga de acuíferos al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018

3.4.1 Volumen de recarga neta potencial al poniente del Estado de México para el año 2000

La tabla 39 muestra el volumen de recarga neta potencial de las zonas bajas, medias y altas para el año 2000. Las zonas bajas en total muestran una recarga neta potencial de (88,984 Mm³). Por su parte las zonas medias en total presentan una recarga neta potencial (427,355 Mm³). Finalmente las zonas altas en total expresan una recarga neta potencial de (79,639 Mm³). El volumen de recarga neta potencial total para el año 2000 fue de (595,978 Mm³).

Tabla 39. Volumen de recarga neta potencial al poniente del Estado de México en millones de metros cúbicos (Mm³) para el año 2000

Recarga neta potencial (Mm³)	Superficie (ha)	Total de recarga neta potencial (Mm³)
Baja 0-2	44,492	88,984
Media 2.1-5	85,471	427,355
Alta 5.1-7	11,377	79,639

Fuente: Elaboración propia (2020).

La tabla 40 muestra el volumen de recarga neta potencial que almacena cada municipio al poniente del Estado de México para el año 2000. El municipio de Villa Victoria presentó una recarga neta potencial de (200,238 Mm³), posteriormente el municipio de San José del Rincón obtuvo una recarga neta potencial de (188,672 Mm³), consecuentemente el municipio Villa de Allende mostró una recarga neta potencial de (126,319 Mm³) y finalmente el municipio de Donato Guerra adquirió una recarga neta potencial de (80,749 Mm³).

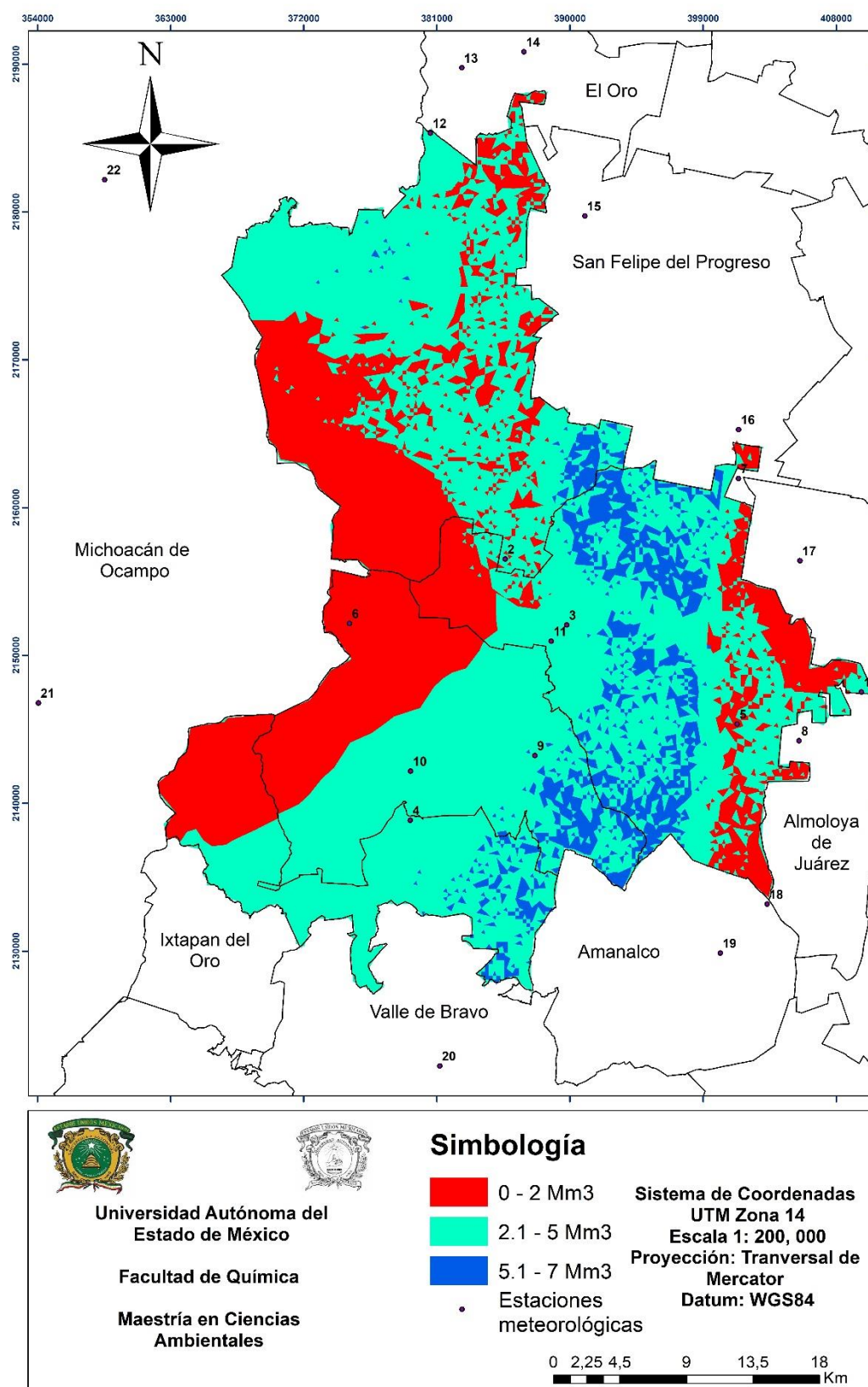
Tabla 40. Volumen de recarga neta potencial por municipio al poniente del Estado de México en millones de metros cúbicos (Mm³) para el año 2000

Municipio	Recarga neta potencial (Mm ³)	Superficie (ha)	Total de recarga neta potencial (Mm ³)	Total de recarga neta potencial por municipio (Mm ³)
Villa Victoria	Baja	11,209	22,418	200,238
	Media	25,274	126,370	
	Alta	7,350	51,450	
San José del Rincón	Baja	17,772	35,544	188,672
	Media	29,360	146,800	
	Alta	904	6,328	
Villa de Allende	Baja	10,596	21,192	126,319
	Media	18,308	91,540	
	Alta	1,941	13,587	
Donato Guerra	Baja	4,915	9,830	80,749
	Media	12,529	62,645	
	Alta	1,182	8,274	

Fuente: Elaboración propia (2020).

El mapa 13 muestra la distribución espacial de las zonas bajas, medias y altas de recarga neta potencial y la distribución espacial de 22 estaciones meteorológicas que permitieron obtener datos de precipitación y temperatura media anual, las zonas bajas se localizan al oeste, este, norte y centro, posteriormente las zonas medias se encuentran ubicadas al norte, centro y sur, finalmente las zonas altas se sitúan al centro y sur del área de estudio.

Mapa 13. Volumen de recarga neta potencial al poniente del Estado de México en millones de metros cúbicos (Mm³) [2000]



Fuente: Elaboración propia (2020).

3.4.2 Volumen de recarga neta potencial al poniente del Estado de México para el año 2018

La tabla 41 muestra el volumen de recarga neta potencial de las zonas bajas medias y altas para el año 2018. Las zonas bajas en total muestran una recarga neta potencial de (75,246 Mm³). Por su parte las zonas medias en total presentan una recarga neta potencial (439,520 Mm³). Finalmente las zonas altas en total expresan una recarga neta potencial de (110,691 Mm³). El volumen de recarga neta potencial total para el año 2018 fue de (625,457 Mm³).

Tabla 41. Volumen de recarga neta potencial al poniente del Estado de México en millones de metros cúbicos (Mm³) para el año 2018

Recarga neta potencia (Mm ³)	Superficie (ha)	Total de recarga neta potencial (Mm ³)
Baja 0-2	37,623	75,246
Media 2.1-5	87,904	439,520
Alta 5.1-7	15,813	110,691

Fuente: Elaboración propia (2020).

La tabla 42 muestra el volumen de recarga neta potencial que almacena cada municipio al poniente del Estado de México para el año 2000. El municipio de Villa Victoria presentó una recarga neta potencial de (211,492 Mm³), posteriormente el municipio de Villa de Allende obtuvo una recarga neta potencial de (157,683 Mm³), consecuentemente el municipio de San José del Rincón mostró una recarga neta potencial de (156,800 Mm³) y finalmente el municipio de Donato Guerra adquirió una recarga neta potencial de (99,482 Mm³).

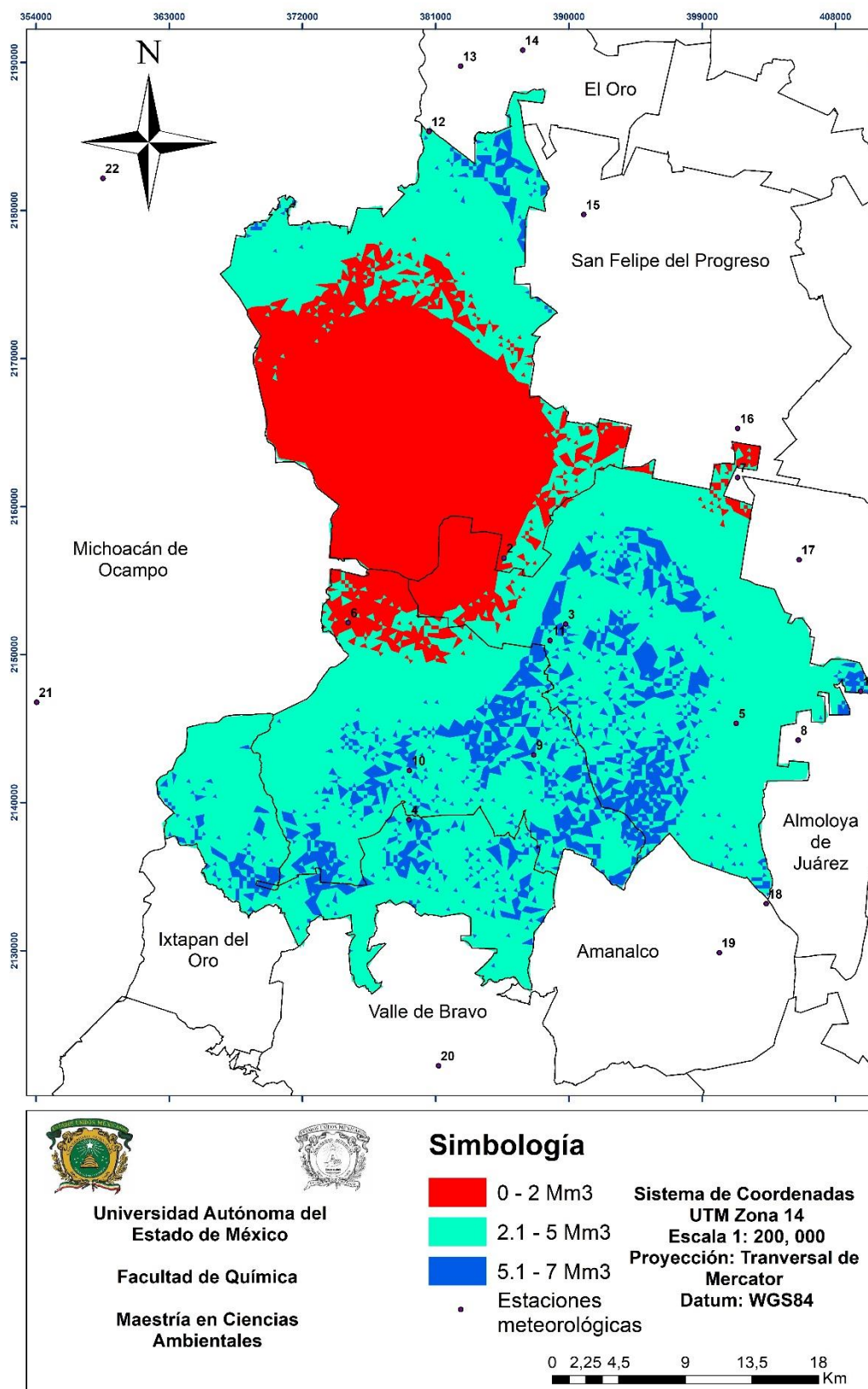
Tabla 42. Volumen de recarga neta potencial por municipio al poniente del Estado de México en millones de metros cúbicos (Mm³) para el año 2018

Municipio	Recarga neta potencial (Mm ³)	Superficie (ha)	Total de recarga neta potencial (Mm ³)	Total de recarga neta potencial por municipio (Mm ³)
Villa Victoria	Baja	3,624	7,248	211,492
	Media	31,844	159,220	
	Alta	6,432	45,024	
Villa de Allende	Baja	2,568	5,136	157,683
	Media	22,605	113,025	
	Alta	5,646	39,522	
San José del Rincón	Baja	31,431	62,862	156,800
	Media	17,340	86,700	
	Alta	1,034	7,238	
Donato Guerra	Baja	0	0	99,482
	Media	16,115	80,575	
	Alta	2,701	18,907	

Fuente: Elaboración propia (2020).

El mapa 14 muestra la distribución espacial de las zonas bajas, medias y altas de recarga neta potencial y la distribución espacial de 22 estaciones meteorológicas que permitieron obtener datos de precipitación y temperatura media anual, las zonas bajas se localizan al noroeste y centro-este, posteriormente las zonas medias se encuentran ubicadas al norte, este y sur, finalmente las zonas altas se sitúan al norte y sur de la zona de estudio.

Mapa 14. Volumen de recarga neta potencial al poniente del Estado de México en millones de metros cúbicos (Mm³) [2018]



Fuente: Elaboración propia (2020).

El incremento de cobertura forestal de un año inicial (2000) a un final (2018) permitió mayor volumen de recarga neta potencial (almacenamiento de agua subterránea). Los cuatro municipios al poniente del Estado de México muestran un incremento en los ecosistemas forestales (bosque de oyamel, mixto de pino-encino y de pino) lo cual genera que la infiltración del agua sea mayor.

Así mismo, apartir del año 2007 se instituyó el Fidecomiso para el Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos del Estado de México (FIPASAHM) en los municipios del área de estudio, que tenía por objetivo compensar a dueños de predios forestales por los servicios ambientales hidrológicos que proporcionan con la finalidad de proteger, conservar, manetener y/o incrementar la cobertura arbolada de sus bosques, para garantizar la capacidad de recarga de los mantos acuíferos a través de una compensación económica de \$1500.00 por hectárea (PROBOSQUE, 2020).

Además, el aumento del volumen de recarga neta potencial en los cuatro municipios del área de estudio está determinado por la variación que existe entre los datos registrados de precipitación y temperatura media anual de los años 2000 y 2018 que muestran las 22 estaciones meteorológicas consultadas en el Servicio Meteorológico Nacional.

Las zonas bajas medias y altas del volumen de recarga neta potencial han presentado cambios al pasar los años. La tabla 43 muestra la diferencia de superficie y del volumen de recarga neta potencial de un año inicial (2000) a un año final (2018). Las zonas bajas de recarga neta potencial obtuvo una disminución de (6,869 ha) generando así una pérdida de recarga hídrica de (13,738 Mm³). Por su parte las zonas medias presentaron un incremento de (2,433 ha) creando así una mayor recarga hídrica de (12,165 Mm³). Finalmente las zonas altas lograron un incremento de (4,436 ha) creando así una mayor recarga de agua subterránea de (31,052 Mm³).

Tabla 43. Cambios en el volumen de recarga neta potencial en millones de metros cúbicos (Mm³) al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018

Recarga neta potencial	Superficie 2000 (ha)	Total de recarga neta potencial 2000 (Mm ³)	Superficie 2018 (ha)	Total de recarga neta potencial 2018 (Mm ³)	Diferencia de superficie 2000-2018 (ha)	Diferencia total de recarga neta potencial 2000-2018 (Mm ³)
Baja	44,492	88,984	37,623	75,246	-6,869	-13,738
Media	85,471	427,355	87,904	439,520	+2,433	+12,165
Alta	11,377	79,639	15,813	110,691	+4,436	+31,052

Fuente: Elaboración propia (2020).

3.5 Relación de la captura de carbono con el volumen de recarga de acuíferos al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018

La captura de carbono y recarga de acuíferos se encuentran clasificados en los servicios ecosistémicos de soporte, los cuales son necesarios para el desarrollo de otros servicios. En los cuatro municipios al poniente del Estado de México el análisis de los servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono y recarga de acuíferos permitió identificar si existe relación entre ambos servicios.

El análisis de ambos servicios ecosistémicos de soporte permitió identificar que no existe relación entre ellos, esto debido a que la relación que existe por cada uno de los servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono y recarga de acuíferos es proporcional con la cobertura forestal.

En la captura de carbono al poniente del Estado de México, se identificó que fue mayor el almacenamiento en el año 2018 que en el año 2000 resultado del incremento que existió en la superficie de los ecosistemas forestales.

En la recarga de acuíferos (volumen de recarga neta potencial), se identificó que la infiltración de agua fue mayor en el año 2018 que en el año 2000 resultado del incremento de superficie de los ecosistemas forestales y por la variación que existe en los datos de precipitación y temperatura media anual publicados por las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional. Para el año

2000 los datos publicados se encontraban más completos, por lo contrario, para el año 2018 no existían datos por lo que se retomó información del año más cercano y completo, la información corresponde al año 2016. A pesar de que se estimaron y analizaron otras ecuaciones para calcular el volumen de recarga neta potencial, la precipitación y temperatura media anual fueron dos variables claves en los resultados.

El incremento de cobertura forestal en el área de estudio está asociado al desarrollo de programas que tienen como objetivo conservar y restaurar espacios forestales a través del pago por servicios ambientales a dueños de predios forestales.

3.6 Discusión General

De acuerdo al análisis de los resultados obtenidos en la presente investigación y considerando los elementos teóricos, conceptuales, metodológicos y la aplicación de sistemas de información geográfica (SIG), se determina la discusión.

Desde el punto de vista ambiental, las ciencias ambientales emprenden como una ciencia holística que permite sustentar el análisis de los servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono y recarga de acuíferos a través de la integración de disciplinas, puesto que permite comprender los problemas ambientales y así desarrollar estrategias de mitigación. De acuerdo con RCFA (2007), las ciencias ambientales es un nuevo campo de estudio y acción que surge ante la necesidad de comprender y encontrar soluciones a la grave y compleja crisis ambiental que vive la sociedad globalizada en sus relaciones con la naturaleza, de la cual sólo se ha tomado conciencia en las últimas décadas.

Desde el punto de vista teórico, existen fundamentos de la Teoría General de Sistemas de Ludwig Von Bertalanffy que se encuentran vigentes y permiten sustentar esta investigación del análisis de los servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono y recarga de acuíferos, puesto que proporciona como objeto comprender la organización de los ecosistemas presentes en el área de estudio a través de una variedad de sistemas. De acuerdo con Bertalanffy (1987), la Teoría General de Sistemas es un conglomerado de ideas y principios que ayudan a comprender la organización de un determinado

espacio geográfico, el cual está compuesto por una gran variedad de sistemas, los cuales a su vez se componen de subsistemas (estos tienen las mismas funciones y características de los sistemas) todo esto, dentro de una organización jerárquica y entre los cuales se presenta un incesante flujo de energía, materia e información.

Otro elemento que se consideró de la Teoría General de Sistemas es que permite expresar los resultados de captura de carbono y recarga de acuíferos de manera cuantitativa. De acuerdo con Domínguez y López (2017), la TGS se utiliza en cualquier área, sin importar si son ciencias duras o blandas, es adaptable ya que puede expresar los resultados en términos cuantitativos, cualitativos o ambos.

La Geografía se caracteriza como una ciencia que permite estudiar la relación que existe entre el ser humano y la naturaleza en determinado espacio geográfico mediante la comprensión hechos y fenómenos a través del tiempo, lo que permitió analizar los cambios de uso del suelo, captura de carbono y del volumen de recarga neta potencial de agua subterránea de un año inicial (2000) a un año final (2018). La geografía, como ciencia, se fundó en la búsqueda de una comprensión de la distribución, localización e interrelación de los objetos, hechos, fenómenos y procesos que tienen lugar en la superficie terrestre (Álvarez, 2012).

La Geografía Ambiental se caracteriza como una ciencia auxiliar de la Geografía y al estudiar la relación espacial y temporal de las actividades antropogénicas sobre el ambiente, permitió analizar el proceso de cambio de uso del suelo entre los ecosistemas de un año inicial (2000) a un año final (2018) en el área de estudio. De acuerdo con Cervantes *et al.* (2014), la geografía ambiental es una disciplina emergente, que trata el análisis del medio ambiente, ya que se ocupa de las relaciones entre el hombre y la naturaleza en el espacio y tiempo, y se orienta a la protección del ambiente, su objeto de estudio se centra en las variantes que se detectan y producen en esa interrelación sociedad/naturaleza, las cuales conforman los diversos tipos de ambiente y derivan en consecuencias que inciden en los factores económicos y sociales, generando cambios a mayor velocidad que los procesos naturales.

Los estudios de cambio de uso de suelo y vegetación son el referente para conocer las trayectorias de los distintos procesos de cambio que existen en determinado territorio (Mas y Flamenco, 2011). En los cuatro municipios al poniente del Estado de México el crecimiento de los ecosistemas forestales ocasiono cambios en las coberturas de uso del suelo y vegetación, dicha transformación está enfocada en la protección y conservación de espacios forestales, provocando con ello mayor captura de carbono.

Para comprender la dinámica y procesos de cambios al poniente del Estado de México, fue necesario desarrollar un estudio de cambios de cobertura y uso del suelo que permitiera identificar los ecosistemas que obtuvieron mayores ganancias y pérdidas de superficie de un año inicial (2000) a un año final (2018). El análisis de los cambios de cobertura y uso del suelo en cualquier territorio conlleva a comprender como interactúan los diversos factores socioeconómicos y biofísicos que en él se encuentran (Pineda *et al.*, 2011).

Los servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono y recarga de acuíferos al poniente del Estado de México brindan al ser humano beneficios indirectos a través de la captura de carbono que es un elemento dañino que se respira y beneficios directos mediante la recarga hídrica porque es necesaria para la vida del ser humano. Los servicios ecosistémicos son la multitud de beneficios que la naturaleza aporta a la sociedad, la biodiversidad es la diversidad existente entre los organismos vivos, que es esencial para la función de los ecosistemas y para que estos presten sus servicios (FAO, 2020).

La captura de carbono en los cuatro municipios al poniente del Estado de México ha sido mayor en el año 2018 que en el año 2000, lo cual es el resultado del crecimiento de superficie en los ecosistemas forestales, la conservación de los bosques en el área de estudio mejorará las condiciones de vida de los seres vivos. Los bosques juegan un papel primordial en el ciclo de carbono al absorber y retener CO₂ atmosférico, el cual en parte fluye de nuevo a la atmósfera en los procesos de respiración autotrófica (en la vegetación) y heterotrófica (en el suelo) [Pardos, 2010].

La recarga de acuíferos (volumen de recarga neta potencial) al poniente del Estado de México ha sido mayor la del año final (2018) que la del año inicial

(2000), la cual está relacionada con el crecimiento de superficie de los ecosistemas forestales y por los datos registrados de precipitación y temperatura media anual de 22 estaciones meteorológicas consultadas en el Servicio Meteorológico Nacional. Los ecosistemas influyen en el funcionamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas a través de su contribución a intercepción de lluvia, evapotranspiración, infiltración de agua y recarga de agua subterránea (Locatelli, 2016).

Desde el punto de vista metodológico, se implementó el método híbrido para elaborar la cartografía de los ecosistemas presentes para los años 2000 y 2018, puesto que permitió combinar un proceso de clasificación supervisada e interdependiente para así obtener altos porcentajes de fiabilidad global y exactitud para cada ecosistema clasificado. De acuerdo con Mas *et al.* (2017), un método híbrido de clasificación es la combinación de un procesamiento digital e interpretación visual que permite generar mapas de diferentes fechas con base en procesos de mejora de la escala de cartografía.

Los resultados referentes a los ecosistemas presentes en el área de estudio para los años 2000 y 2018 expresan la identificación de 9 de los cuales los ecosistemas forestales presentaron un incremento de superficie. Por su parte Camacho (2019), establece la identificación de 7 ecosistemas y también el crecimiento de cobertura forestal. Lo que indica que los resultados difieren en la identificación de los ecosistemas presentes pero coinciden en el crecimiento de superficie de cobertura forestal.

Por otra parte Camacho-Sanabria (2019), establece la identificación de 4 ecosistemas para el año 1989 y de 5 para el año 2009, los resultados difieren en la identificación de los ecosistemas, en los años de estudio y en los municipios que integran el área de estudio, además de que existió una pérdida de superficie de cobertura forestal.

La cartografía de los ecosistemas presentes al poniente del Estado de México para los años 2000 y 2018, expresan una fiabilidad global del 97%, valor que excede el porcentaje mínimo permitido para la validación cartográfica que es del 80% (Stehman y Czaplewski, 1998; Mas y Couturier 2011).

En el estudio de Camacho (2019), la fiabilidad global que expresó la cartografía para los años 2000 y 2018 fue mayor a 98%, los resultados muestran confiabilidad en la cartografía de ambos estudios con pequeña diferencia entre ellos.

Por otra parte Camacho-Sanabria (2019), muestra una fiabilidad global del 80.29% para el año 1989 y de 89.61% para el años 2009, los resultados muestran confiabilidad en la cartografía, aunque es importante mencionar que existe diferencia de área de estudio, años de estudio y en las coberturas de uso del suelo.

Durante el periodo 2000-2018 los resultados referentes a la captura de carbono en el área de estudio expresan que existió un incremento de captura de carbono de 242,105 ton*ha, lo cual se asocia al incremento de superficie de cobertura forestal a través de los los programas de conservación y restauración de espacios forestales. Por su parte Flores (2019), establece que en la Región VI Ixtapan de la Sal existió un incremento de captura de carbono de 52,555.2 toneladas durante el periodo 2005-2013. Los resultados indican que ha existido un incremento de captura de carbono en ambos estudios, aunque es importante mencionar que difieren en cuanto al área de estudio, en el análisis del periodo de tiempo y en los ecosistemas forestales.

En el área de estudio durante el periodo 2000-2018 el crecimiento de cobertura forestal de (5,082 ha) generó un incremento de captura de carbono de 242,205 ton*ha. De acuerdo con Orozco *et al.* (2013), establecen que la cubierta forestal en el Estado de México presentó ganancia de superficie de bosque durante de el periodo 2002-2010, esta estimación reporta la captura de 234 toneladas de carbono por hectárea. Los resultados difieren en las toneladas de carbono almacenado que genera una hectárea de bosque, en el periodo de tiempo y en el área de estudio.

El volumen de recarga neta potencial al poniente del Estado de México se calculó mediante el método del balance hídrico a través del desarrollo de distintas ecuaciones con el uso de datos de precipitación y temperatura media anual, lo que permitió calcular el volumen de recarga neta potencial e identificar las zonas bajas, medias y altas de recarga hídrica para los años 2000 y 2018. De acuerdo

con Vásquez (2019), el balance hídrico determina los flujos de entrada y de salida de un sistema, y la recarga al acuífero constituye el residuo de la ecuación de balance hídrico.

Durante el periodo 2000-2018 los resultados referentes al volumen de recarga neta potencial en el área de estudio expresan que existió un incremento de recarga hídrica, lo cual se asocia a los datos registrados de precipitación y temperatura media anual de 22 estaciones meteorológicas. Por su parte Castro *et al.* (2016), mencionan que en la Reserva de la Biosfera del Triunfo (REBITRI) el volumen de recarga neta potencial es mayor dentro de la reserva que fuera de ella. Los resultados indican la recarga hídrica que ha existido en ambos sitios a través del volumen de recarga neta potencial, aunque es importante mencionar que difieren en el área de estudio y en el periodo de tiempo ya que en el estudio de la REBITRI el análisis fue para un año.

En el área de estudio las zonas de recarga hídrica están clasificadas en baja, media y alta, las cuales en un periodo de 18 años (2000-2018) presentaron incremento en el volumen de recarga neta potencial de 29,479 Mm³. De acuerdo con Donis (2015), establece zonas de recarga hídrica las cuales están clasificadas en alta, moderada, bajo y muy bajo, la microcuenca del Río Negro posee un porcentaje muy bajo de recarga hídrica del 23.36% concentrándose en las partes altas y medias de la misma. Los resultados muestran diferencia en la clasificación de las zonas de recarga hídrica, en la zona de estudio y en la metodología utilizada en cada caso de estudio.

Por su parte Ramírez *et al.* (2018), establecieron la clasificación de 5 zonas de recarga las cuales son muy baja de 1.0-1.99 , baja de 2.0-2.56, moderada de 2.6-3.49, alta de 3.5-4.09 y muy alta de 4.1-5.0. Para el caso de estudio se establecieron 3 zonas de recarga hídrica las cuales están clasificadas en baja de 0-2, media de 2.1-5 y alta de 5.1-7. Los resultados muestran diferencia en la escala de intervalos por los datos obtenidos en cada estudio, en la zona de estudio, además es importante mencionar que la metodología es diferente en cada caso de estudio.

CONCLUSIONES

Con base en el análisis de los objetivos e hipótesis planteado en esta investigación se determinan las conclusiones.

Durante el periodo de estudio (2000-2018) los servicios ecosistémicos de soporte de captura de carbono y recarga de acuíferos presentaron cambios positivos al tener mayor captura y recarga en el año final que en el inicial.

El incremento de superficie de la cobertura forestal al poniente del Estado de México permitió mayor captura de carbono para el año 2018 que para el año 2000.

Los ecosistemas forestales presentes en el área de estudio presentaron un incremento considerable en su superficie para el año 2018: el bosque de oyamel con (2,834 ha), el bosque mixto de pino-encino con (1,147 ha) y el de pino con (1,101 ha).

En el área de estudio el incremento de la superficie de los ecosistemas forestales es el resultado de la implementación de programas que tienen como propósito la conservación y restauración de espacios forestales a través del Pago por Servicios Ambientales.

Los programas que se han desarrollado en los municipios que integran el área de estudio y aledaños son PROCARBONO Y FIPASAHM.

Referido lo anterior, en un periodo de 18 años el incremento de captura de carbono fue de (242,205 ton*ha), de los cuales corresponden (131,781 ton*ha) al bosque de oyamel, (55,033 ton*ha) al bosque mixto de pino-encino y (55,391 ton*ha) al bosque de pino. El municipio del área de estudio que obtuvo mayor captura de carbono para ambos años fue San José del Rincón.

El incremento del volumen de recarga neta potencial (recarga de acuíferos) al poniente del Estado de México para el año 2018, está determinado principalmente por los datos registrados de precipitación y temperatura media anual de las estaciones meteorológicas consultadas, además del incremento de cobertura forestal.

En el área de estudio de las 22 estaciones meteorológicas consultadas en el Servicio Meteorológico Nacional, 14 presentaron mayor precipitación media anual en el año 2016 que en el año 2000.

En el área de estudio las zonas bajas, altas y medias de recarga hídrica están determinadas por la localización de las estaciones meteorológicas y por los datos registrados de precipitación y temperatura media anual que hay en cada una de ellas.

En un periodo de 18 años el incremento del volumen de recarga neta potencial fue de (29,479 Mm³). El municipio del área de estudio que obtuvo mayor volumen de recarga neta potencial para ambos años fue Villa Victoria.

El análisis de los servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono y recarga de acuíferos para los años 2000 y 2018 a través de su cálculo permitió identificar cual de ambos años obtuvo mayor almacenamiento de carbono y recarga de agua subterránea, además de conocer la importancia que tiene la cobertura forestal en los resultados.

Referente a las limitantes que se presentaron en el análisis de la captura de carbono es que no se consideraron las características físico-geográficas particulares de cada zona de estudio de los cuales fueron retomados los valores de los índices de captura de carbono obtenidos por los autores citados.

Otra de las limitantes que se presentaron en este análisis fue la medición de altura de los árboles por la complejidad que conlleva este proceso, por lo que se realizó de manera indirecta por debajo del árbol y no de manera directa.

Referente a las limitantes que se presentaron en el análisis de la recarga de acuíferos (volumen de recarga neta potencial) es que los datos de precipitación y temperatura media anual que presentan las estaciones meteorológicas no están actualizados.

Otra de las imitantes en este estudio es que la localización de las estaciones meteorológicas condiciona a través de los datos de precipitación y temperatura media anual las zonas de recarga hídrica.

Este trabajo permite ampliar el conocimiento sobre la importancia que deben adquirir las problemáticas ambientales en el contexto municipal, estatal y federal, y así mejorar el desarrollo de programas y estrategias que mitiguen los factores que están alterando al medio ambiente, esto permite contribuir a mejorar las condiciones del territorio.

RECOMENDACIONES

Sería conveniente utilizar el método híbrido porque permite combinar clasificación supervisada e interdependiente y así mejorar la escala de análisis, además de obtener cartografía a mayor detalle. También sería conveniente realizar un análisis sobre la dinámica de cambios entre los diferentes usos del suelo porque accede a identificar los procesos de transformación y asemejar cual es la tendencia que seguirá.

Sería conveniente realizar el cálculo de la captura de carbono porque permite identificar la importancia que tienen los ecosistemas forestales en el área de estudio, además de identificar la localización espacial de cada uno de ellos de manera específica.

Se sugiere realizar el cálculo de la recarga de acuíferos porque permite identificar las zonas de mayor y menor filtración hídrica en el área de estudio, además de la importancia que tiene la conservación de los ecosistemas forestales para mejorar los niveles de recarga de agua subterránea.

En estudios posteriores sería conveniente actualizar las bases de datos de las estaciones meteorológicas (precipitación y temperatura media anual) para mejorar las investigaciones relacionadas con este tipo de datos.

Los datos e insumos cartográficos presentados en este trabajo se pueden utilizar para la elaboración de futuras investigaciones en el contexto municipal, estatal y federal, lo que permite servir como un antecedente para aumentar el conocimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Agoglia, O. (2010). La crisis ambiental como proceso. Un análisis reflexivo sobre su emergencia, desarrollo y profundización desde la perspectiva de la teoría crítica (tesis de posgrado). Universidad de Girona, Girona, España.
- Álvarez, P. (2012). Enfoques de la ciencia geográfica y su proyección en el proceso de enseñanza-aprendizaje. *Revista Científico-Metodológica*, 54: 58-64.
- Aparicio F. J. (2009). "Fundamentos de hidrología de superficie". 1ra Edición. ISBN 10: 968-18-3014-8. Editorial Limusa, México. Pp. 303.
- Arrellano, A. (2009). "La guerra entre ciencias exactas y humanidades en el fin del siglo: el "escándalo" Sokal y una propuesta pacificadora". *Ciencia Ergo Sum*, 7(1): 56-66.
- Arnold, M. y Osorio, F. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas. *Cinta de Moebio*, 3: 1-12.
- Avendaño, D., Acosta, M., Carrillo, F. y Etchevers, J. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de Abies religiosa. *Revista fitotecnica mexicana*, 32(3).
- Balasubramanian, A. (2008). Ecosystem and its components. Centre for Advanced Studies in Earth Science, University of Mysore: 1-6.
- Balek, J. (1998). Groundwater recharge concepts. En: Estimation of Natural Groundwater Recharge. Boston: Ed. Reidel, NATO ASI Series, 3-19.
- Balvanera, P., Quijas, S., Karp, D., Ash, N., Bennett, E., Boumans, R., Brown, C., Chan, K., Chaplin, R., Halpern, B., Honey, R., Ki, C., Cramer, W., Martínez, M., Mooney, H., Mwampamba, T., Nel, J., Polasky, S., Reyers, B., Roman, J., Turner, W., Scholes, R., Tallis, H., Thonicke, K., Villa, F., Walpole, M. y Walz, A. (2017). *Ecosystem Services*. Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, AP 27-3, México City, Michoacán, México: 39-77.
- Benjamín, J. y Masera, O. (2001). Captura de Carbono ante el cambio climático. Instituto de Ecología, A.C. *Madera y Bosques*, 7(1): 3-12.

- Berry, M. W., R. O. Flamm, B. C. Hazen, y MacIntyre, R. L. (1996). The Land-Use Change and Analysis System (LUCAS) for Evaluating Landscape Management Decisions, *IEEE Computational Science y Engineering*, 3(1), 24-35.
- Bertalanffy, L. (1998). *Teoría General de Sistemas*. DF, México: Fondo de Cultura Económica.
- Bertoglio, J. (1993). *Introducción a la Teoría General de Sistemas*. DF, México: Limusa.
- Bocco, G. y Urquijo, P. (2013). Geografía ambiental: reflexiones teóricas y práctica institucional. *Región y Sociedad*, 25(56): 75-101.
- Boerema, A., Rebelo, A., Bodi, M., Esler, K. y Meire, P. (2017). Are ecosystem services adequately quantified? *Journal of Applied Ecology*, 54: 358–370
Doi: <http://doi.org/0.1111/1365-2664.12696>
- Bolin, B., B. R. Döös, J. Jager y R.A. Warrick. (1986). The greenhouse effect, climate change and ecosystems. Ed. John Wiley & Sons.
- Braimoh, A.K. (2006). Random and systematic land-cover transitions in northern Ghana. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113 (1-4), 254-263.
- Buendia, E., Vasrgas, R., Leyva, A. y Terrazas, S. (2002). Aplicación de redes neuronales artificiales y técnicas sig para la predicción de coberturas forestales. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8(1): 31-37.
- Buzai, G. & Baxendale, C. (2006). *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica*. Buenos Aires: Lugar.
- Camacho, J. (2016). Cambios de cobertura y uso del suelo en el surponiente del estado de México. Modelos dinámicos y prospectivos. Aportación teórica – metodológica en las ciencias ambientales (tesis de posgrado). Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química, Toluca, México.

- Camacho, J. (2019). Análisis de los cambios de cobertura forestal en el poniente del Estado de México: 2000-2018 (tesis de licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Geografía, Toluca, México.
- Camacho-Sanabria, J. M. (2019). Alcance descriptivo de los cambios de cobertura y uso del suelo. El caso de la Porción Surponiente del Estado de México (1989-2009). México: Universidad de Quintana Roo y Colegio de Ciencias Geográficas del Estado de México, A.C., 136 pp.
- Camacho, R. (2017). "Conversión en sistemas agrícolas y su efecto en la temperatura. Escenarios prospectivos en Progreso Hidalgo, Estado de México 2000-2015" (tesis de posgrado). Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química, Toluca, México.
- Camacho, V. y Ruiz, L. (2011). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. Laboratorio de Manejo Ambiental del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD), *Revista Bio Ciencias*, 4(1): 3-15.
- Card, H. D. (1982). Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(3), 431-439.
- Casanova, J., Devau, N. y Pettenati, M. (2016). Managed Aquifer Recharge: An Overview of Issues and Options. A.J. Jakeman et al. (eds.), *Integrated Groundwater Management*, 16: 413-434. Doi. http://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_16
- Castro, I., Magdaleno, R., Cruz, E., Reynoso, R. y López, W. (2016). Balance hídrico de la cuenca Pijijiapan en Chiapas, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*: 2(37): 18-28.
- Caudillo, L. (2008). "Identificación de parámetros de un Acuífero No Confinado utilizando el Método del Sistema Diferencial Modificado formulando con Elementos Finitos" (tesis de posgrado). Centro de Investigación en Matemáticas, A. C. Guanajuato, México.
- Cervantes, M., Franco, A. y Juárez, M. (2014). *Geografía ambiental de México*. Distrito Federal, México: Jornadas.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco. Estado de México. CONAGUA.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero Valle de Bravo-Villa Victoria. Estado de México. CONAGUA.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2019). Sistema Nacional del Agua. Obtenida el 21 de enero de 2019 de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/sistema-nacional-de-informacion-del-agua-sina>
- Congalton, R. G. (1988). A comparison of sampling scheme use in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(5), 593-600.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote Sensing of the Environment*, 37, 35-46.
- Congalton, R., M. E. Martin, S. D. Newman y J. D. Aber. (1998). Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data. *ELSEVIER* (65):249–254.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2001). *Población. Estado de México*. México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2008). Información edafológica digital escala 1:1 000 000. México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2008). Información hidrográfica digital escala 1:4 000 000. México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2008). Información de la precipitación media anual digital escala 1:4 000 000. México.

- Coy, M. (2015). Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la subcuenca del Río Tzunutz (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, Alta Verapaz, Guatemala.
- Custodio, E. (1997). Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos. La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Textos del seminario celebrado en las palmas de Gran Canaria. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 83-108.
- Daily, G.C. (1997). (Ed.). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: *Island Press*: 392.
- De Groot, R. S., Wilson, M. A. y Boumans, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41: 393-408.
- Demeritt, D. (2009). Geography and the Promise of Integrative Environmental Research. *Geoforum*, (40): 127-129.
- Díaz, R., Acosta, M., Carrillo, F., Buendía, E., Flores, E. y Etchevers, J. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1): 25-34.
- Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., Wisniewski, Y.J. (1994). Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, 263, pp. 185-190.
- Dominguez, V. y López, M. (2017). Teoría General de Sistemas, un enfoque práctico. *Tecnociencia Chihuahua*, 10(3): 125-132.
- Donis, L. (2015). Identificación de zonas de recarga hídrica en la microcuenca del Río Negro, Ciudad de Guatemala (tesis de pregrado). Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Guatemala de la Asunción, Guatemala.
- Fik, T. J. (200). *The geography of economic development: regional changes, global challenges*. EE.UU.: McGraw-Hill.

- FIRCO (2002). "Fideicomiso de Riesgo Compartido 2002. Diplomado Nacional de Rehabilitación de Microcuencas". Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). México.
- Flores, L. (2019). Servicios ecosistémicos en la Región VI Ixtapan de la Sal, Estado de México (tesis de posgrado). Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Geografía, Toluca, México.
- Flórez, A. y Thomas, J. (1993). La Teoría General de Sistemas. *Cuadernos de Geografía*, 4(1-2): 111-137.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). Servicios ecosistémicos y biodiversidad. Recuperado el 15 de marzo de 2020 de <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/>
- García-Mora, T. J. & Mas, J. F. (2008). Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, (67), 7-19.
- Giannuzzo, A. (2010). Los estudios sobre el ambiente y la ciencia ambiental. *Scientle Studia*, 8(1): 129-156.
- Halffter, G. (2003). Biogeografía de la entomofauna de montaña de México y América Central. In J. J. Morrone y J. Llorente-Bousquets (Eds.), *Una perspectiva latinoamericana de la biogeografía* (pp. 87-97). México: Facultad de Ciencias, UNAM.
- Herrera, I. (2016). La importancia del bosque en la recarga hídrica natural del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 3(1): 17-26.
- Herrera, I. y Brown, O. (2011). Propuesta de una metodología para la estimación de áreas de recarga hídrica en Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(4): 48-52.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1980). *X Censo General de Población y Vivienda 1980*. México.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1990). *XI Censo General de Población y Vivienda 1990*. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1995). *Conteo de Población y Vivienda 1995*. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2000). *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2001). Información fisiográfica digital escala 1:1 000 000, serie I. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2003). Información de uso de suelo y vegetación digital escala 1:250 000, serie III. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2005). *II Conteo de Población y Vivienda 2005*. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). Información climatológica digital escala 1:1 000 000, serie I. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009). Guía para la interpretación de cartografía de uso del suelo y vegetación digital escala 1:250 000, serie III. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009a). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Donato Guerra, México. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009b). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. San José del Rincón, México. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009c). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Villa de Allende, México. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009d). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Villa Victoria, México. México.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). *Marco Geoestadístico Nacional*. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Información de uso de suelo y vegetación digital escala 1:250 000, serie VI. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). Información topográfica digital escala 1:250 000, serie V. México.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1995). *Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press. Cambridge, Inglaterra.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Jaiswal, A. (2018). Ecology and Ecosystem. *Human Growth Development and Nutrition*: 1-13.
- Jenkins, M. y Schaap, B. (2018). Forest Ecosystem Services. *Forest Ecosystem Services*: 1-41.
- Jensen, J. (1996). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective* (2a. ed.). NJ: Prentice – Hall. Upper Saddle River.
- Jiménez, J., Treviño, E. y Yerena, J. (2013). Concentración de carbono en especies del bosque de pino-encino en la Sierra Madre Oriental. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 4(17).
- Juan, J., Monroy, J., Gutiérrez, J., Franco, R., Antonio, X., Balderas, M., Edward, M. (2010). *Estudios locales de cambios globales: El clima de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca, Estado de México*. México: Universidad Autónoma del Estado de México.

- Juan, J.I. (2013). Manejo de recursos naturales y procesos agrícolas para el turismo rural campesino en un ejido de transición ecológica de México. (Primera parte). *PASOS Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 11(2), 237-342.
- Karnosky D., Ceulemans R., Scarascia- Mugnozza G., Innes J. L. (2001). *The Impact of Carbon Dioxide and Other Greenhouse Gases on Forest Ecosystems*. IUFRO Research Series nº8, pp 352.
- Kumar, P. y Ghose, M. (2017). Remote sensing-derived spectral vegetation indices and forest carbon: testing the validity of models in mountainous terrain covered with high biodiversity. *Forests*, 10(112): 2043-2050.
- Lerner, D. (1990). Techniques. Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH, 99-229.
- Llerena C. (2003). "Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua. Conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú". Foro Regional sobre sistemas de pago por servicios ambientales. Arequipa, Perú. Pp. 16.
- Lira, J. (2010). *Tratamiento digital de imágenes multiespectrales* (2da. ed.). México: UNAM.
- Locatelli, B. (2016). Ecosystem Services and Climate Change. *Routledge Handbook of Ecosystem Services*: 481-490. Doi: <http://doi.org/978-1-138-02508-0>
- Mas, J. F., Reyes, J., & Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, (51), 53-72. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/569/56905105.pdf>
- Mas, J. F. y Couturier S. (2011). Evaluación de Bases de Datos Cartográficas. In F. Bautista (Ed.), *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (2da. ed., pp. 675-703). México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental y el Instituto de Geografía.

- Mas, J. y Flamenco, A. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/ uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTropico*, 5(1), 1-24.
- Mas, J., Lemoine, R., González, R., López, J., Piña, A. y Herrera, E. (2017). Evaluación de las tasas de deforestación en Michoacán a escala detallada mediante un método híbrido de clasificación de imágenes SPOT. *Madera y Bosques*, 23(2). Doi: <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2017.2321472>
- Meyer, W. B. y Turner II, B. L. (1992). Human population growth and global land-use/cover change. *Annual Review of Ecology and Systematics*, (23), 39-61.
- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. (2005). Washington, DC: World Resources Institute, 82.
- Morales, J. (2017). Las ciencias ambientales. Una caracterización desde la epistemología sistémica Environmental Sciences. A characterization from the systemic epistemology. *Nova Scientia*, 9(1): 646 – 697.
- Mori, A., Lertzman, K. y Gustafsson, L. (2017). Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: a research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*, 54: 12-27. Doi: <http://doi.org/10.1111/1365-2664.12669>
- Orozco, M., Míreles, P., Valdez, M., Valdés, A. (2013). Cubiertas forestales y escenarios de carbono en el Estado de México, 2002-2010. *Revista Geográfica de América Central*, 2(51): 169-188.
- Orozco, T. y Manterola, C. (2017). Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. *Int. J. Morphol*, 35(1): 227-232.
- Pardos, J., (2010). *Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global*, Madrid, España: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
- Pasad, J., Khoiyangbam, R. y Gupta, N. (2015). Environmental Sciences: Scope and Importance. *Introduction to Environmental Sciences*, 1-13.

- Pauliet, S., Ennos, R. y Goldingy, Y. (2005). "Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change: a study in Merseyside, UK". In *Landscape and Urban Planning*. N° 71.
- Peña, E. y Roldán, J. (2012). Las ciencias ambientales: un área del conocimiento para el desarrollo de enfoques interdisciplinarios. *Ambiente y Sostenibilidad*, (2): 38-43. Doi: <https://doi.org/10.25100/ays.v2i1.4325>
- Pettenati, M., Perrin, J., Pauwels, H. y Ahmed, S. (2013). Simulating fluoride evolution in groundwater using a reactive multicomponent transient transport model: application to a crystalline aquifer of Southern India. *Appl Geochem*, 29:102–116.
- Pineda, N., Bosque, J., Gómez, M. y Franco, R. (2011). Análisis de los factores inductores de los cambios en la superficie forestal del Estado de México en el periodo 1993-2000. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 56, 9-34.
- Pontius, R., Shusas, E., & McEachern (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 101(2-3), 251-268.
- PROBOSQUE. (29 de junio de 2020). EDOMEX PROCARBONO, Secretaría del Medio Ambiente. Recuperado de <http://probosque.edomex.gob.mx/procarbono>
- PROBOSQUE. (26 de octubre de 2020). Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAHM), Secretaría del Medio Ambiente. Recuperado de <http://probosque.edomex.gob.mx/fipasahem>
- Ramírez, E., Sánchez, C., Enríquez, M. y Gutiérrez, M. (2018). Identificación de sitios potenciales de recarga de acuíferos mediante uso de vehículos aéreos no tripulados en la Universidad del Mar campus Puerto Ángel. *Ciencia y Mar*, 21(63): 13-18.
- Ramírez, G., Méndez, J., Vilanova, E., Gutiérrez, N., Andrades, J., Gámez, L., Ramírez, A. y Torres, A. (2016). Almacenamiento de carbono y captura de co2 como servicios ecosistémicos de la cuenca del Río Mucujún. *Rev. For. Venez*, 60: 7-16.

- Raj, D., Gómez, H., Del Carmen, N., De Jesús, O., Molina, L., Jiménez, J., Venegas, J., Pinto, R., Ley, A. y Guevara, F. (2018). Potencial de almacenamiento de carbono en áreas forestales en un sistema ganadero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(48): 150-180. Doi: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.184/>
- RCFA. (2007). Las ciencias ambientales como un área de conocimiento. En Las ciencias ambientales: una nueva área del conocimiento, compilado en Orlando Sáenz, 13-27. Bogotá: Red Colombiana de Formación Ambiental.
- Rémi, J. y Nicolás G. (1991). Signes géographiques: choremes et tegeos. *Cahiers de Géographie de Quebec*, 35(96): 535-564.
- Romahn, C., y Ramirez, H. (2010). *Dendrometría*. México, México: División de Ciencias Forestales.
- Saavedra, G. (2014). Ciencias ambientales y ecología. *Mundo Siglo XXI*, 33(9): 63-79.
- Sanguin, A. (1980). Panorama contemporain de la Géographie occidentale. *Madagascar Revue de Géographie*, 36: 9-19.
- SARH-CP (1982). "Manual de Conservación del Suelo y del Agua". Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Colegio de Postgraduados. 2a ed. Dirección General de Conservación del Suelo y Agua, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2009). *Restauración de ecosistemas forestales*. Jalisco, México: Comisión Nacional Forestal.
- SEMARNAT (2002). "Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000". Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, Distrito Federal, extraído de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NOM-011-CNA-2000.pdf>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2020). Normales Climatológicas por Estado. México, extraído de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=mex>

- Simmers, I. (1990). Aridity, groundwater recharge and water resources management. Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH, 1-20.
- Singh, Y. (2006). *Enviromental science*, Uttar Pradesh, India: New Age International (P) Limited, Publishers.
- Siso, G. (1982). Tradiciones geográficas y geografía económica (pp. 39-50), en Síntesis Geográfica. Vol. 10, N° 10. Julio-Diciembre, 1981. Caracas: Escuela de Geografía, Universidad Central de Venezuela
- Siso, G. (2010). ¿Qué es la Geografía?. *Terra Nueva Etapa*, 26(39): 147-182.
- Soto, M. (2016). Características del enfoque de Sistemas. Recuperado el 22 de abril de 2020 de <https://es.scribd.com/doc/50665962/Caracteristicas-del-Enfoque-de-Sistemas>
- Springgay, E., Ramirez, S. C., Janzen, S. y Brito, V. V. (2019). The Forest-Water Nexus: An International Perspective. *Forests*, 10(915): 1-20. Doi: <http://doi.org/10.3390/f10100915>
- Stehman, S. y Czaplewski, R. (1998). *Desing and analysis for thematic map accuracy assessement fundamental principies*. Remote Sensing of Environment 64:331-334.
- Stoddart, D. (1967). Organism and ecosystem as geographical models *Chorley y Hagget*. 511-548.
- Tansley, A. (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 16 (3): 284-307.
- Triviño, E. (2016). El enfoque de sistemas y su importancia. Recuperado el 22 de abril de 2020 de <https://es.scribd.com/doc/52457486/El-enfoque-de-sistemas-y-su-importancia>
- Turner, B. L. y Meyer, W. B. (1994). Global land use and land cover change: an over-view en W. B. Meyer y B. L. Turner II, *Changes in land use and land cover: a global perspective*. Cambridge University Press.

- Turner II, B. L., Skole, D., Sanderson, S., Fischer, G., Fresco, L. y Leemans, R. (1995). Land-Use and Land-Cover change. Science/Research Plan. IGBP Report No. 35, HDP Report No. 7, Stockholm and Geneva.
- Varni, M. (2013). Aplicación de varias metodologías para estimar la recarga al acuífero pampeano, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(3): 67-85.
- Vásquez, L. (2019). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. Posgrado en Aprovechamiento de recursos Hidráulicos, Universidad Nacional – Medellín: 1-21.
- Vilá Valentí, J. (1983). Introducción al estudio teórico de la Geografía. Barcelona: Ariel.
- Villers, R. y Trejo, V. (1998). Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in México. *Climate Research* 9:87-93.
- Velázquez, A., Bocco, G. y Siebe, C. (2014). Cambio de uso del suelo. *Red Temática de CONACYT sobre Medio Ambiente y Sustentabilidad*: 1-5. http://www.wikiensuma.mx/contenido/Cambio_de_uso_del_suelo
- Venail, P. (2012). Biodiversidad y ecosistemas. *Biodiversidad, conservación y desarrollo*: 117-135.
- Wettstein, G., J. Rojas L. y J. Valbuena (Comp., 1975). La percepción en geografía. Cuaderno N° 49. Mérida: Escuela de Geografía, Universidad de los Andes.
- Wrigley, E. A. (1965). Changes in the philosophy of geography (pp. 3-20), en Chorley y Haggett (Ed., 1965).
- Yáñez, A. (2004). La captura de carbono en bosques: ¿una herramienta para la gestión ambiental?. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Gaceta Ecológica*, 70: 5-18.

- Young, B. E., Lips, K. R., Reaser, J. K., Ibañez, R., Salas, A. W., Cedeño, J. R., Coloma, L. A., Ron, S., La Marca, E., Meyer, J. R., Muñoz, A., Bolaños, F., Chaves, G. y Romo, D. (2001). Population declines and priorities for amphibian conservation in Latin America. *Conservation Biology*, 15(5): 1213-1223. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2001.00218.x>
- Zeski, E. (2020). A Framework for Characterizing and Regulating Ecosystem Services in a Management Planning Context. *Forests*, 11(102): 1-20. Doi: <http://doi.org/10.3390/f11010102>